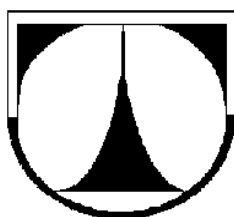


TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

Fakulta mechatroniky a mezioborových inženýrských studií



BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Liberec 2009

David Pavlík

TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

Fakulta mechatroniky a mezioborových inženýrských studií

Studijní program: B 2612 – Elektrotechnika a informatika

Studijní obor: 2612R011 – Elektronické informační a řídicí systémy

Digitální holografie

Digital holography

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Autor: David Pavlík

Vedoucí práce: Ing. Vít Lédl

Konzultant: Ing. Roman Doleček

Zadání originál

PROHLÁŠENÍ

Byl jsem seznámen, že na mou bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č.121/2000 o právu autorském, zejména § 60 (školní dílo).

Beru na vědomí, že TUL má právo na uzavření licenční smlouvy o užití mé BP a prohlašuji, že souhlasím s případným užitím mé bakalářské práce (prodej, zapůjčení, atd.).

Jsem si vědom toho, že užít své bakalářské práce či poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem TUL, která má právo ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, vynaložených univerzitou k vytvoření díla (až do jejich skutečné výše).

Bakalářskou práci jsem vypracoval samostatně s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím bakalářské práce a konzultantem.

V Liberci dne 29. 5. 2009

.....
David Pavlík

ABSTRAKT

Tématem této bakalářské práce je digitální holografie. Digitální holografie navazuje na klasickou holografii. Jako záznamové médium je většinou použita CCD kamera. Hologram je digitálně zpracován a vyhodnocen, následně díky numerické rekonstrukci je možné rekonstruovat obraz zaznamenaného předmětu. V bakalářské práci jsou navrženy dvě různá uspořádání pro záznam digitálního hologramu. Jejich správnost byla testována experimentálně a numerickou rekonstrukcí získaných hologramů pomocí Fresnelovi aproximace.

Klíčová slova: digitální holografie, CCD, numerická rekonstrukce.

ABSTRACT

This bachelor thesis deals with digital holography. Digital holography tie together on classical holography. As recording medium is mostly used the CCD camera. Hologram is digitally processed and evaluation, then by the aid of numerical reconstruction is possible to create image of the original object. In bachelor are proposed two different set-up for recording digital hologram. Their rightness was tested experimentally and by numerical reconstruction of gained holograms with the aid of Fresnel approximation.

Key words: digital holography, CCD, numerical reconstruction.

OBSAH

Seznam obrázků a tabulek	6
Seznam zkratk	7
Úvod	8
1 Teoretická část	9
1.1 Světlo	9
1.2 Intenzita	10
1.3 Polarizace	11
1.4 Koherence	13
1.5 Interference	14
1.6 Difrakce	17
1.7 Laser	20
1.8 Holografie	20
1.9 Digitální holografie	24
1.9.1 CCD kamera	25
1.9.2 Digitální holografie a CCD	27
1.9.3 Uspořádání pro záznam digitálního hologramu (set-up)	29
2 Experimentální část	32
2.1 Uspořádání pro záznam a rekonstrukci digitálního hologramu	32
2.1.1 Použité komponenty pro první uspořádání	33
2.1.2 Postup při záznamu digitálního hologramu	35
2.2 Druhé uspořádání pro záznam a rekonstrukci digitálního hologramu	37
2.2.1 Použité komponenty pro druhé uspořádání	37
2.2.3 Postup při záznamu digitálního hologramu	39
2.3 Numerická rekonstrukce sejmutého hologramu	40
3 Výhody a nevýhody různých uspořádání a přístupů k rekonstrukci hologramu	44
Závěr	46
Seznam použité literatury	48
Příloha	49

Seznam obrázků a tabulek

<i>Obr. 1: Elektromagnetické vlnění.....</i>	9
<i>Obr. 2: Rozložení barev světla pro různé vlnové délky.....</i>	10
<i>Obr. 3: a) Nepolarizované světlo.....</i>	12
<i> b) Lineárně polarizované světlo.....</i>	12
<i>Obr. 4: Polarizace světla odrazem</i>	12
<i>Obr. 5: Interference dvou rovinných vln pod úhlem θ</i>	16
<i>Obr. 6: Interferenční obrazec: vzniklý superpozicí dvou kulových vln a superpozicí dvou eliptických gaussových paprsků</i>	17
<i>Obr. 7: Huygensův princip</i>	18
<i>Obr. 8: Souřadnicový systém pro matematické vyjádření $H.p$</i>	19
<i>Obr. 9: Činitel sklonu</i>	20
<i>Obr. 10: Záznam hologramu</i>	21
<i>Obr. 11: Rekonstrukce hologramu</i>	22
<i>Obr. 12: Rekonstruovaný svazek</i>	23
<i>Obr. 13: a) hologram zaznamenaný použitím fotografického filmu</i>	23
<i> b) hologram při záznamu na CCD</i>	23
<i>Obr. 14: Architektury CCD</i>	24
<i>Obr. 15: Souřadnicový systém pro numerickou rekonstrukci hologramu</i>	26
<i>Obr. 16: Principiální uspořádání pro digitální záznam hologramu</i>	30
<i>Obr. 17: Principiální uspořádání pro záznam větších objektů</i>	31
<i>Obr. 18: Schéma prvního uspořádání pro záznam digitálního hologramu</i>	32
<i>Obr. 19: První uspořádání pro záznam a rekonstrukci digitálního hologramu</i>	35
<i>Obr. 20: Nasnímaný digitální hologram 1024 x 1024 pixelů</i>	36
<i>Obr. 21: Schéma druhého uspořádání pro záznam digitálního hologramu</i>	37
<i>Obr. 22: Zrcadlo Cassegrainova typu.....</i>	38
<i>Obr. 23: Druhé uspořádání pro záznam a rekonstrukci digitálního hologramu</i>	39
<i>Obr. 24: Nasnímaný digitální hologram 1024 x 1024 pixelů</i>	40
<i>Obr. 25: Rekonstruovaný obraz</i>	43
<i>Obr. 26: Odstranění stejnosměrné složky</i>	43
 <i>Tabulka. 1: Důležité data vybraných CCD kamer</i>	 28

Seznam zkratek

<i>Zkratka</i>	<i>Rozměr</i>	<i>Význam</i>
B	$[kg.s^{-1}.C^{-1}]$	magnetická indukce
c	$[m.s^{-1}]$	rychlost světla ve vakuu
d	$[m]$	vzdálenost předmětu od hologramu, CCD
E	$[V.m^{-1}]$	vektor intenzity elektrického pole
E_R		komplexní amplituda referenční vlny
f	$[Hz]$	frekvence
H	$[A.m^{-1}]$	vektor intenzity magnetického pole
h		funkce hologramu
I	$[W.m^{-2}]$	intenzita
L	$[m]$	délka stěny čtvercového objektu
L_K	$[m]$	koherenční délka
n		index lomu
\vec{n}		jednotkový vektor
Q		činitel sklonu
S	$[W.m^{-2}]$	Poytingův vektor
T	$[s^{-1}]$	perioda
T_K	$[s]$	časové zpoždění
t	$[s]$	čas
Δt	$[s]$	časový rozdíl
U		komplexní amplituda vlny
$\Delta x, \Delta y$	$[m]$	velikost pixelu
α_B	$[^{\circ}]$	polarizační úhel
λ	$[m]$	vlnová délka
φ	$[rad]$	fázový rozdíl
ω	$[rad.s^{-1}]$	úhlová rychlost
μ	$[N.A^{-2}]$	permeabilita vakua
$\Delta\sigma$		šířka spektra
θ	$[^{\circ}]$	úhel mezi referenční a objektovou vlnou
Γ		komplexní amplituda světelného pole
ρ	$[^{\circ}]$	vzdálenost mezi dvěma body rovin

Úvod

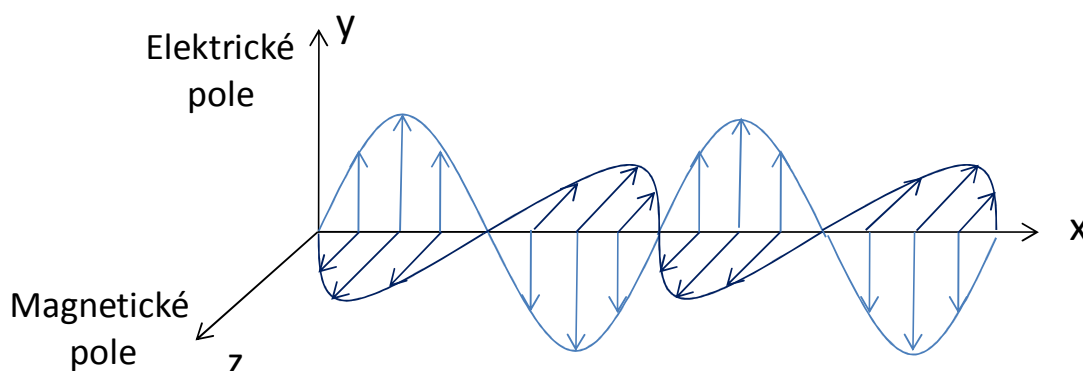
Digitální holografie je v posledních letech velmi často využívaná metoda záznamu obrazu předmětu. Navazuje na klasickou holografii, té už v roce 1948 dal Denis Gabor teoretické základy, avšak teprve vynalezením laseru dosáhla velkého vývoje. První trojrozměrný záznam, zobrazující vláček, se podařilo vytvořit vědcům na michiganské univerzitě v roce 1964. Holografie jako taková je založena na interferenci vysoce koherentního světla, světelný svazek odražený od objektu a referenční svazek spolu interferují a vzniklý interferenční obrazec je zachycen na záznamové médium (např. fotografický film). Vzniklý hologram nese informace o fázi a intenzitě vlny odražené od objektu, rekonstrukcí hologramu jsme tedy schopni zobrazit trojrozměrnou strukturu zaznamenaného objektu. V digitální holografii je jako záznamové médium většinou použito CCD. Uspořádání pro záznam digitálního hologramu jsou limitována velikostí obrazového bodu CCD v tom smyslu, že úhel mezi referenčním svazkem a svazkem odraženým od objektu musí být mnohem menší, nežli u klasické holografie, abychom byli schopni co nejlépe zaznamenat miniaturní interferenční obrazec. Hologram zachycený CCD kamerou je digitálně zpracován a vyhodnocen, následně je možné numerickou rekonstrukcí vytvořit obraz zaznamenaného objektu.

Bakalářská práce je rozdělena do dvou částí, teoretické a experimentální. Teoretická část práce obsahuje rešerši na téma digitální holografie. Rešerše pojednává o základních pojmech, problémech a vlastnostech souvisejících s digitální holografií, jejichž znalost je nezbytná pro realizaci experimentů. Druhou částí práce je navrhnout a experimentálně provést dvě různá uspořádání pro záznam a rekonstrukci digitálního hologramu. Do této části také patří numerická rekonstrukce digitálního hologramu, která je zde popsána a za pomoci které je ověřena správnost navržených uspořádání. Posledním tématem bakalářské práce jsou výhody a nevýhody různých uspořádání a přístupů k rekonstrukci digitálního hologramu.

1 Teoretická část

1.1 Světlo

Díky světelnému záření jsme schopni zaznamenat informace o struktuře předmětu. Světlo má formu elektromagnetického vlnění, ale také na něj můžeme nahlížet jako na proud částic, tedy proud fotonů. V holografii je pro nás důležitější vlnová povaha světla.



Obr. 1: Elektromagnetické vlnění

Elektromagnetické vlnění vzniká například kmitáním elektrického dipólu, kde elektrické pole vyvolá magnetické a naopak, tento rozruch se šíří ve vakuu rychlostí světla $c = 2,9998,10^8 \text{ ms}^{-1}$. Jak je vidět na Obr. 1 vektory elektrického a magnetického pole jsou navzájem kolmé, jejich velikost se mění harmonicky, přičemž jsou oba pohyby ve fázi. Na vlnění tedy můžeme nahlížet jako na pohyb, který vykonávají konce vektorů intenzity elektrického a magnetického pole. Obvykle uvažujeme pouze intenzitu elektrického pole, právě na ni oko reaguje. Konce vektorů vykonávají kmitavý pohyb a jsou vzájemně fázově posunuty podle rychlosti šíření vlny. Stav výchylky světelné vlny v čase t můžeme vyjádřit...

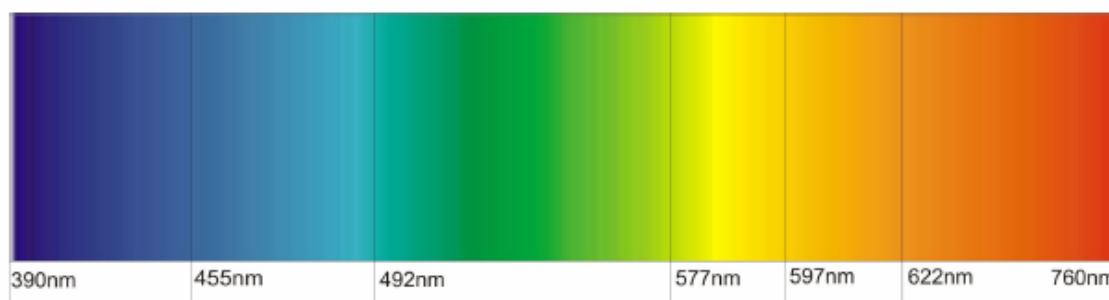
$$y = U \sin(\omega t + \varphi), \quad (1)$$

kde U je maximální amplituda vlnění, ω úhlová rychlost a φ počáteční fáze.

Vzdálenost dvou nejbližších bodů, které kmitají se stejnou fází se nazývá vlnová délka λ a čas potřebný při šíření k překonání této vzdálenosti je perioda T . Převrácená hodnota periody je frekvence f , viz (2).

$$\lambda = \frac{c}{f} \quad (2)$$

Různé frekvence světla vidíme jako barvy, od červeného světla s nejnižší frekvencí a nejdelší vlnovou délkou po fialové s nejvyšší frekvencí a nejkratší vlnovou délkou. Směřujeme-li dále do kratších vlnových délek, vedle viditelného světla se nachází ultrafialové (UV) a směrem k delším vlnovým délkám je to infračervené záření (IR)



Obr. 2: Rozložení barev světla pro různé vlnové délky

Holografie je spojena např. s pojmy intenzita světla, interference světla, difrakce světla, polarizace.

1.2 Intenzita

Intenzita světla je jediný parametr, na který přímo reagují světelné senzory, jako je např. oko, fotografický film nebo CCD kamera. Je definována jako tok energie procházející plochou za jednotku času. Velikost intenzity můžeme vyjádřit Poyntingovým vektorem, který je dán vektorovým součinem elektrického a magnetického pole světla viz (3), kde \vec{E} je vektor intenzity el. pole a \vec{H} vektor intenzity magnetického pole.

$$\vec{S} = \vec{E} \times \vec{H} \quad (3)$$

$$H = \frac{B}{\mu} = \frac{E}{\mu c} \quad (4)$$

Jelikož vektory intenzity elektrického a magnetického pole jsou navzájem kolmé a intenzitu mag. pole můžeme vyjádřit vztahem (4), pro intenzitu získáváme rovnici (5).

$$I = \frac{E^2}{\mu c} \quad (5)$$

Je zřejmé, že výsledná intenzita není lineárně závislá na intenzitě el. pole, ale platí $I \approx E^2 \approx U^2$, U je komplexní amplituda vlnění. Zavedením komplexních čísel v Eulerově tvaru se nám výpočty velmi zjednoduší. Reálná složka komplexního čísla pak odpovídá trigonometrickému řešení. Uvažujeme-li pouze závislost na komplexní amplitudě U a vynecháme-li konstanty dostáváme $I = UU^* = |U|^2$. V ideálním případě je světlo monochromatické, kolem nás však intenzita světla velmi rychle kolísá. Nebyly vynalezeny žádné měřicí prostředky, které jsou schopny tyto časté změny sledovat. Byla proto zavedena tzv. střední hodnota intenzity, tu získáme statistickým středováním, viz (6).

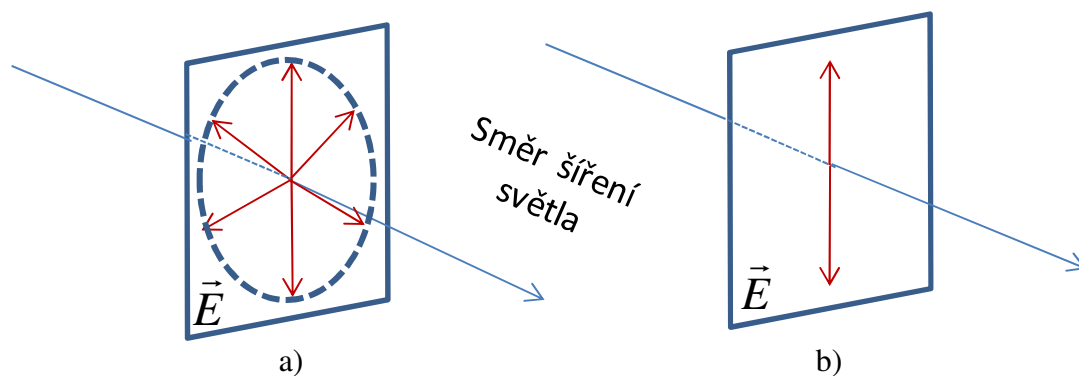
$$I(r, t) = \langle U(r, t)U^*(r, t) \rangle = \langle |U(r, t)|^2 \rangle \quad (6)$$

Pro stacionární vlnění můžeme nahradit statistické středování středováním časovým přes určitý interval, který musí být mnohem delší než je perioda (T) vlnění a dostáváme vztah (7).

$$I(r) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{2T} \int_{-T}^T |U(r, t)|^2 dt \quad (7)$$

1.3 Polarizace

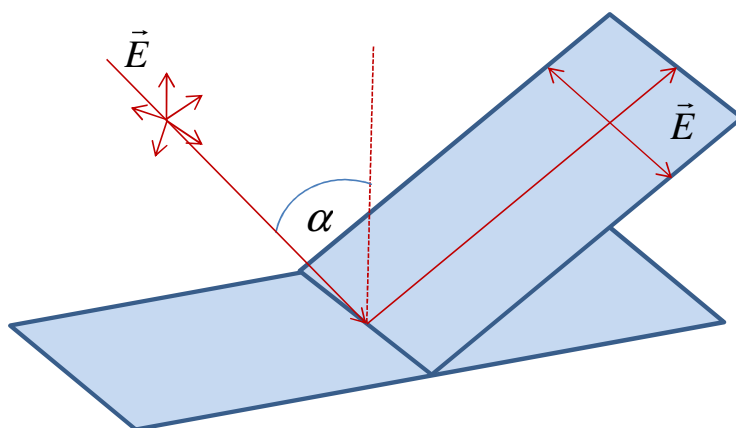
Šíří-li se světlo, tedy elektromagnetické vlnění prostředím vektor intenzity E elektrického pole je vždy kolmý na směr, kterým se vlnění šíří. Jestliže v rovině kolmé k paprsku světla se směr vektoru E nahodile mění (Obr. 3a), označujeme takové světlo za nepolarizované. Světelné vlnění, jehož vektor E kmitá stále v jednom směru, je lineárně polarizované světlo (Obr. 3b). Přirozené světlo lze různými způsoby měnit na světlo polarizované.



Obr. 3: a) Nepolarizované světlo, b) Lineárně polarizované světlo

Polarizované světlo se od světla přirozeného neliší. K tomu, abychom určili orientaci roviny polarizovaného světla použijeme zařízení zvané analyzátor. Ten tvoří opět vhodný polarizační prostředek, který propouští světlo jen s určitou orientací roviny kmitů.

Jestliže nepolarizované světlo dopadá pod určitým úhlem α např. na skleněnou desku (viz Obr. 4), polarizuje se tak, že v odraženém světle vektor E kmitá kolmo k rovině dopadu.



Obr. 4: Polarizace světla odrazem

Polarizace je však jen částečná a závisí na úhlu dopadu světla. Odražené světlo je úplně polarizované jen při určitém úhlu dopadu, jehož velikost závisí na indexu lomu pro rozhraní, na kterém dochází k odrazu. Například při odrazu na skle o indexu lomu $n = 1,5$ nastává úplná polarizace při úhlu dopadu $\alpha_B = 56^\circ$. Tento úhel označujeme jako Brewsterův nebo polarizační úhel. K částečné polarizaci dochází také při lomu světla. V tomto případě je však polarizováno tak, že vektor E kmitá rovnoběžně s rovinou dopadu.

V opticky stejnorodém prostředí se světlo šíří všemi směry a stejnou rychlostí, ale krystaly některých látek jsou z hlediska šíření světla nestejnorodé a rychlost světla procházejícího krystalem je v některých směrech odlišná. Jestliže na takový krystal dopadá světlo, nastává dvojlom. Světelný paprsek se na rozhraní s krystalem rozdělí na dva paprsky: paprsek mimořádný a paprsek řádný. Oba paprsky jsou lineárně polarizované. Nejznámějším minerálem s touto vlastností je islandský vápenec, který tvoří čiré a často velké krystaly.

V technické praxi se k polarizaci světla používají speciální polarizační filtry (polaroidy). Jsou zhotoveny z plastického materiálu, který obsahuje látku s poměrně dlouhými molekulami. Ty jsou upraveny tak, že materiálem projde jen světlo, jehož elektrická složka je kolmá k osám molekul.

Některé zdroje světla generují už polarizované světlo. Například laser LGK 7665P používaný v optické laboratoři RSS TUL k záznamu hologramů má výstupní vlnu elipticky polarizovanou s poměrem velikostí poloos 500:1. Prochází-li tato vlna děličem svazku může nastat, že výstupní svazky mají odlišnou polarizaci a v tomto případě interferenční jev nenastává, je proto nutné, aby při záznamu hologramu, jak digitálně, tak klasickou metodou, byly polarizace referenčního a objektového svazku shodné.

1.4 Koherence

Mnohé optické měřicí metody vyžadují pro svou funkci koherentní zdroj záření. Digitální holografie také využívá koherentních zdrojů, díky tomu jsme schopni, co nejlépe zaznamenat informace o struktuře daného předmětu. V obecném smyslu koherence charakterizuje stupeň synchronnosti dvou dějů. U světla se rozlišuje koherence časová a prostorová.

Elektromagnetické vlnění prochází bodem P v čase t a v čase $(t+\Delta t)$. Jestliže se pro daný interval Δt fázový rozdíl elektromagnetické vlny pro libovolné t nemění, je toto vlnění časově koherentní.

Pokud světelný svazek rozdělíme na dva svazky a necháme společně interferovat s určitým dráhovým rozdílem a uvažujeme, že zdroj světla je bodový, pak je vznik interferenčních proužků projevem časové koherence mezi těmito svazky. Kontrast proužků totiž závisí na časovém zpoždění mezi interferujícími svazky. Interferenční proužky budou pozorovatelné, jestliže časové zpoždění bude nejvýše rovno

$$T_K = \frac{1}{c \cdot \Delta\sigma}, \quad (8)$$

kde c je rychlost světla a $\Delta\sigma$ je šířka spektra vyjádřená rozdílem vlnočtů. Mezní hodnota časového zpoždění T_K se nazývá koherenční čas světla, jemuž odpovídá dráha, nazývaná koherenční délka

$$L_K = c \cdot T_K. \quad (9)$$

Po dosazení rovnice (8) do (9) a vyjádření šířky spektra jako rozdílu vlnových délek, kde λ_{\max} je největší, λ_{\min} nejmenší vlnová délka vyskytující se ve spektru záření zdroje, můžeme pro koherenční délku psát

$$L_K = \frac{\lambda_0^2}{\Delta\lambda}, \quad (10)$$

kde $\lambda_0 = 0,5(\lambda_{\max} - \lambda_{\min})$ je střední vlnová délka a $\Delta\lambda = \lambda_{\max} - \lambda_{\min}$ je rozdíl maximálních a minimálních vlnových délek. Jelikož časovou koherenci ovlivňuje monochromaticnost záření, je možné ji zvýšit omezením počtu podélných módů zdroje záření, např. vytvořením složeného rezonátoru.

Druhým případem je koherence prostorová. Pro ověření prostorové koherence zvolme 2 body v prostoru, jimiž ve stejném čase prochází vlnoplocha elektromagnetické vlny. Těmto bodům přísluší intenzity elektrického pole. Pokud fázový rozdíl elektrických polí bude v obou bodech konstantní a bude-li fázový rozdíl konstantní i v dalším libovolném čase, lze říci, že mezi body existuje koherence. Je-li uvedená podmínka splněna pro všechny dvojice bodů vlnoplochy, je daná vlna zcela prostorově koherentní.

V praxi se ovšem můžeme setkat s problémem velikosti zdroje a rozbíhavosti paprsku. Všechny atomy zdroje vyzařují nepravidelně záření s různou fází, tudíž v případě, že je zdroj příliš plošný nebo paprsky příliš rozbíhavé, dochází k interferenci mnoha nekoherentních vln různých atomů, interferenční obrazce se různě překrývají a tudíž dochází ke ztrátě „informace“.

1.5 Interference

Interference je nedílnou součástí holografie, pod tímto pojmem si můžeme představit vzájemné ovlivňování jevů či interakci hmoty. Nejčastěji se jedná o charakteristickou

vlastnost vln. Při jejich pohybu a prolínání se v určitém bodě vzájemně zesilují intenzitu, zatímco v jiných bodech vzájemně ruší. Tyto jevy se zobrazují pomocí interferenčního obrazce, kde je vidět střídající se projevy zesilování a zeslabování.

Skládají-li se dvě monochromatické vlny s komplexními amplitudami U_1 a U_2 je výsledkem monochromatická vlna o stejné frekvenci s komplexní amplitudou

$$U = U_1 + U_2. \quad (11)$$

Intenzitu skládaných vln můžeme vyjádřit $I = |U_1|^2$ a $I = |U_2|^2$ viz kapitola 1.2, intenzita výsledné vlny je

$$I = |U|^2 = |U_1 + U_2|^2 = |U_1|^2 + |U_2|^2 + U_1^* U_2 + U_1 U_2^*. \quad (12)$$

Zaneseme-li závislost amplitudy na intenzitě a fázi vlny do tohoto vztahu dostaneme interferenční rovnici...

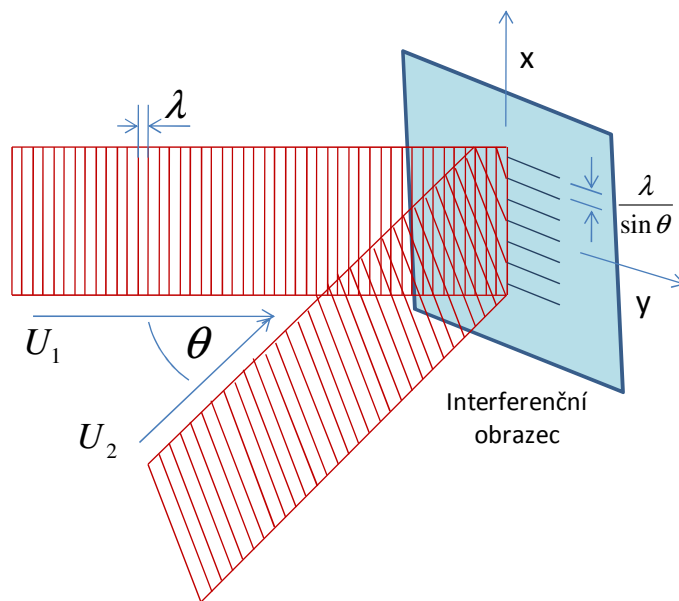
$$I = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \cos \varphi, \quad (13)$$

přičemž

$$\varphi = \varphi_1 - \varphi_2. \quad (14)$$

Intenzita dvou vln není tedy součtem jejich intenzit, v rovnici (13) je přítomen člen příslušný interferenci mezi oběma vlnami. Tento člen může být kladný nebo záporný, což odpovídá konstruktivní nebo destruktivní interferenci. Například je-li $I_1 = I_2$ a $\varphi = 0$, je výsledná intenzita čtyřnásobkem intenzity každé ze skládajících. Pro $\varphi = \pi$ se vlny navzájem vyruší a výsledná intenzita je nulová. Za běžných podmínek není interference téměř pozorovatelná, jestliže fáze jednotlivých vln φ_1, φ_2 náhodně kolísají. Fázový rozdíl φ nabývá náhodných hodnot rovnoměrně rozložených mezi 0 a 2π , takže střední hodnota $\cos \varphi = 0$ a interferenční člen vymizí.

Interferují-li spolu dvě rovinné vlny stejné intenzity šířící se pod určitým úhlem θ viz Obr. 5, vzniklý interferenční obrazec se sinusově mění v závislosti na x s periodou $\lambda / \sin \theta$.



Obr. 5: Interference dvou rovinných vln pod úhlem θ

Monochromatické světlo je samozřejmě idealizací, která se ve skutečnosti nemůže vyskytovat. Zabývejme se teď polychromatickými vlnami. Polychromatická vlna může být rozvinuta do řady, jako součet monochromatických vln použitím Fourierovy metody. Libovolná funkce času, jako je vlnová funkce $u(r, t)$, může být v daném místě vyhodnocena jako superpoziční integrál harmonických funkcí o různých frekvencích, amplitudách a fázích...

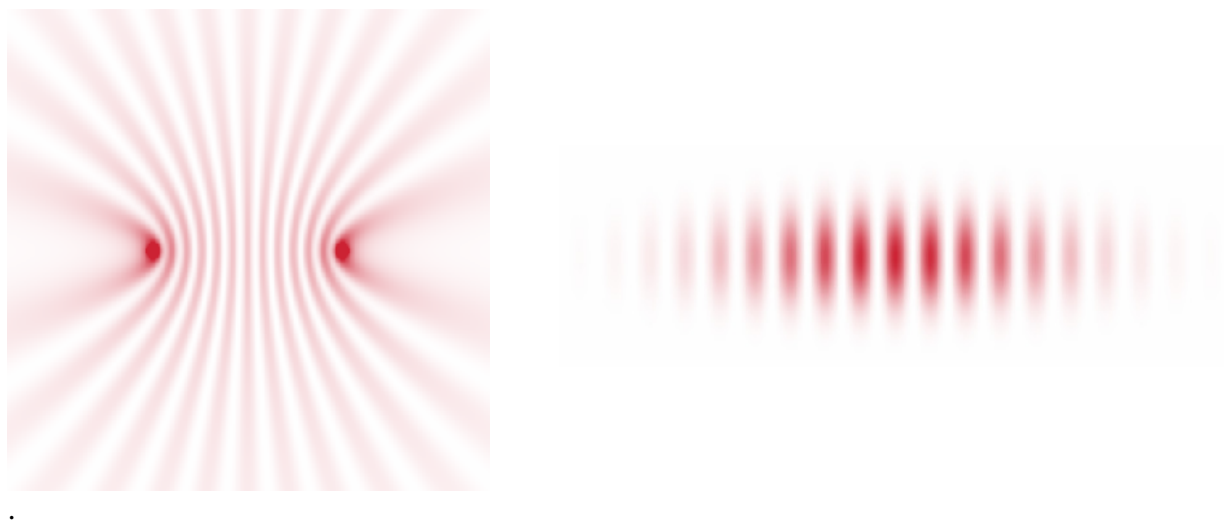
$$u(r, t) = \int_{-\infty}^{\infty} U_f(r) \exp(j2\pi f t) df, \quad (15)$$

kde $U_f(r)$, tedy amplituda určité frekvence v daném místě, je určena Fourierovou transformací viz (16), f frekvence vlnění.

$$U_f(r) = \int_{-\infty}^{\infty} u(r, t) \exp(-j2\pi f t) dt \quad (16)$$

V holografii je interference využita k tomu, aby na záznamové médium, např. fotografický film, byla zanesena nejen informace o amplitudě světla, jako je to u fotografie, ale také o fázi světla. Fáze je zde zakódována ve výsledné vlně vzniklé interferencí. Výsledkem interference, jak již bylo zmíněno, je interferenční obrazec (Obr. 6), který po dopadu na stínítko (film, CCD), vytváří proužky, plochy (uvnitř tlusté vrstvy), světlá a tmavá místa (interferenční

maxima a minima). Vzdálenost interferenčních ploch závisí na úhlu interferujících vln (viz Obr. 5).

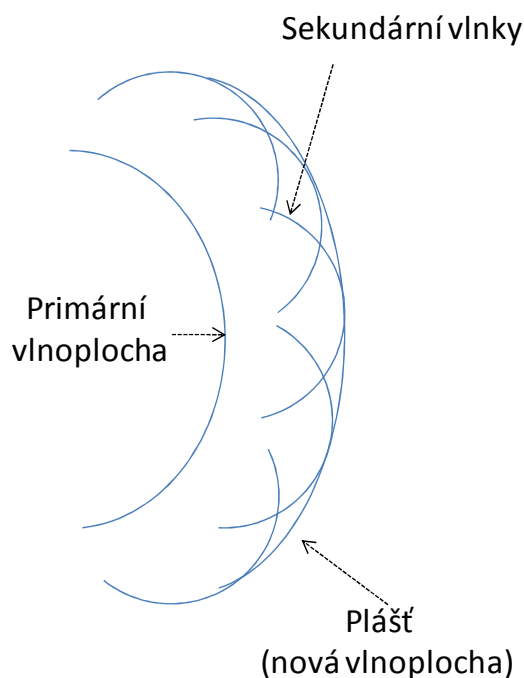


Obr. 6: Interferenční obrazec: vzniklý superpozicí dvou kulových vln a superpozicí dvou eliptických gaussových paprsků.

Dále je interference využita v interferometrech. Interferometr je přístroj, v němž se paprsek elektromagnetické vlny rozštěpí na dva paprsky a každý z nich projde různou dráhou. Po průchodu se oba paprsky opět spojí a navzájem interferují. Ze vzniklého interferogramu s charakteristickými světlými a tmavými proužky, resp. z jejich rozložení, lze změřit dráhový rozdíl interferujících vln. Přístroj se tedy používá převážně k měření malých rozdílů délek, posunutí, deformací, ale také k měření indexu lomu různých optických prostředí, atp. Interferometrie se využívá i v mnoha oblastech mimo optiku (mapování terénu, mechanika, astronomie,...).

1.6 Difrakce

Difrakce označuje jevy, které vznikají při průchodu vlnění otvorem nebo kolem překážky, způsobující narušení vlnění. Difrakce, stejně jako interference úzce souvisí s hologafií. Zatímco za pomoci interference zaznamenáváme světelné informace o předmětu, difrakcí světelné vlny na hologramu jsme schopni rekonstruovat obraz předmětu (viz kapitola 2.3). Jak již bylo řečeno, interferencí světla vznikají mikroskopické interferenční obrazce, ty se v holografii zaznamenávají na záznamové médium (fotografický film, polymer). Médium je přetvářeno interferenčním obrazcem, vytváří se složitá miniaturní struktura různých štěrbin, vrypů nebo ploch uvnitř tlustého média.



Obr. 7: Huygensův princip

Médium může mít neprůsvitný povrch s několika průsvitnými štěrbinami, nebo naopak průsvitný povrch s neprůsvitnými plochami. Pokud rozměry štěrbin nebo neprůsvitných ploch jsou v rozsahu vlnové délky vlny dopadající na médium, zachycené světelné rozložení za médiem není ostře ohraničené a tvoří vzor tmavých a světlých míst. Tento fenomén se nazývá difrakce.

Difrakce může být popsána pomocí Huygensova principu:

Každý bod vlnoplochy může být považován za bodový zdroj pro sekundární kulovou vlnu. Vlnoplocha v kterémkoliv dalším bodě je koherentním složením těchto sekundárních vln (viz Obr. 7).

Fresnel-Kirchoffův integrál popisuje difrakci kvantitativně ...

$$\Gamma(\xi', \eta') = \frac{i}{\lambda} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} U(x, y) \frac{\exp\left(-i \frac{2\pi}{\lambda} \rho'\right)}{\rho'} Q dx dy, \quad (17)$$

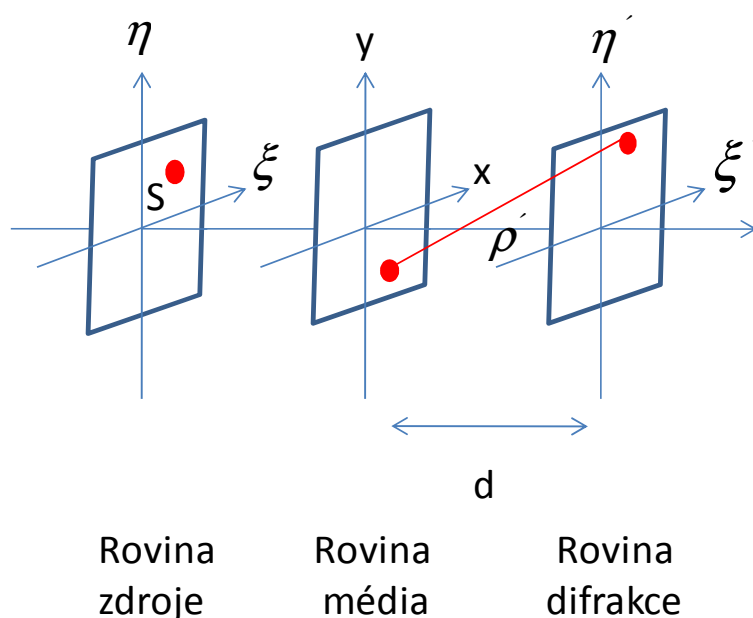
kde

$$\rho' = \sqrt{(x - \xi')^2 + (y - \eta')^2 + d^2} \quad (18)$$

a

$$Q = \frac{1}{2}(\cos \theta + \cos \theta'). \quad (19)$$

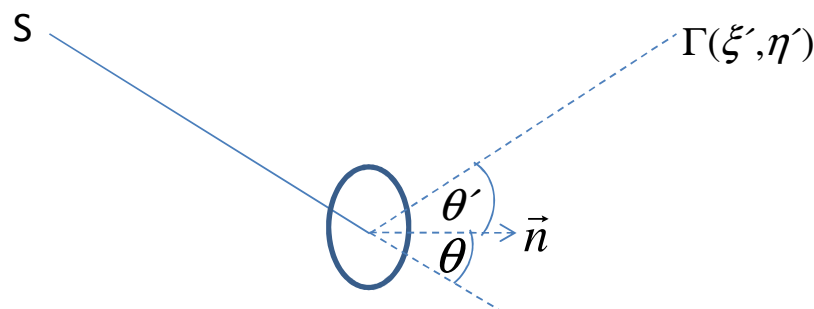
Rovnice (17) může být pochopena jako matematické vyjádření H.p.: Světelný zdroj (S) ležící v rovině zdroje se souřadnicemi (ξ, η) , vyzařuje kulovou vlnu. $U(x, y)$ je komplexní amplituda této vlny v rovině média (před ohybem na štěrbině). Zpočátku uvažujme neprůsvitné médium pouze s jednou štěrbinou na pozici (x, y) . Taková štěrbina je teď zdroj sekundární vlny. $\Gamma(\xi', \eta')$ je světelné pole v pozorované rovině (difrakční rovině). Pole na pozici (ξ', η') v difrakční rovině, je úměrné $U(x, y)$ a poli sekundární kulové vlny vycházející z pozice (x, y) , popsaného $\exp(-\lambda 2\pi / \lambda \rho') / \rho'$. ρ' je vzdálenost mezi bodem v rovině média a bodem v rovině pozorované. Souřadnicový systém je znázorněn na Obr. 8.



Obr. 8: Souřadnicový systém pro matematické vyjádření H.p

Uvažujme-li celé médium za rovinu skládající se z mnoha zdrojů sekundárních vlnění, pak úplný výsledek rozložení světelného pole v difrakční rovině je integrál přes všechny sekundární kulové vlny vycházející z roviny média.

Huygensův princip dovoluje také případ, že sekundární vlny nejsou pouze rozšiřovány směrem dopředu, ale také orientované zpět ke zdroji. Byl proto zaveden tzv. činitel sklonu Q , viz rovnice (19). Q závisí na úhlu θ mezi náhodným paprskem ze zdroje a jednotkovým vektorem \vec{n} , kolmým k rovině média. Úhel θ' svírá ohýbaný paprsek a \vec{n} (viz Obr. 9). Q je přibližně nula pro $\theta \approx 0$ a $\theta' \approx \pi$. Často jsou úhly θ a θ' velmi malé a proto je $Q \approx 1$.



Obr. 9: Činitel sklonu

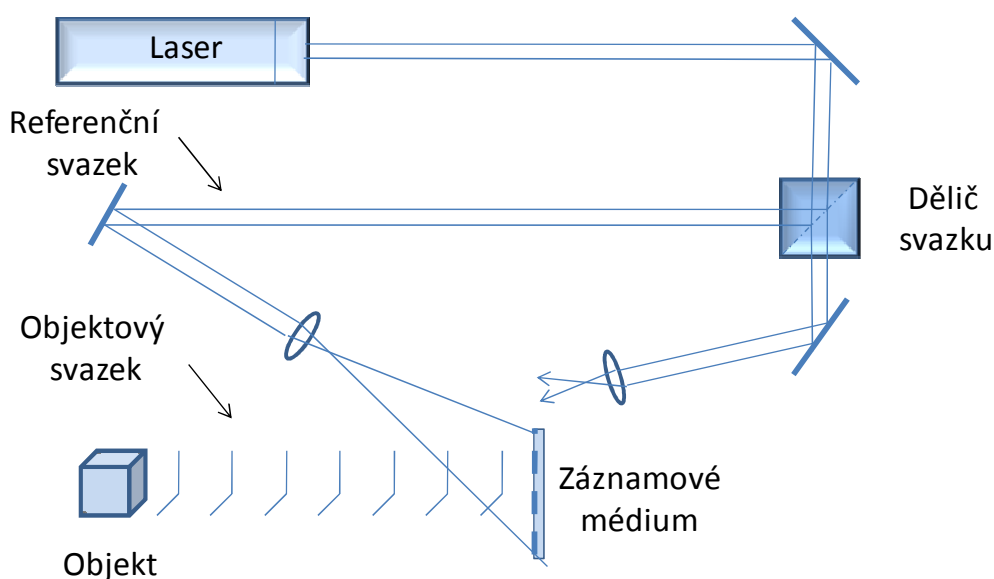
1.7 Laser

Laser je zdroj vysoce koherentního záření. Díky této vlastnosti se využívá v holografii, ta zaznamenala největší vývoj právě po objevení laseru. Pro digitální holografii jsou vhodné plynové He-Ne lasery, protože mají poměrně dlouhou vlnovou délku a tak nejsme tolik omezeni volbou úhlu mezi svazky, jako by tomu bylo při použití kupř. zeleného laseru. V laboratoři optických měření RRS TUL se můžeme setkat s dvěma typy plynných laserů vyzařujících červený paprsek o vlnové délce $\lambda = 632,8nm$. Jednak to je laser LGK 7665P s maximálním výstupním výkonem 15 mW, délkou rezonátoru 637mm a koherenční délkou 20,72cm. Pak také LASER LGK 7634 mající maximální výstupní výkon 2mW s délkou rezonátoru 280mm a koherenční délkou 42,5cm. Změření koherenčních délek těchto laserů bylo cílem bakalářské práce, viz seznam použité literatury [9].

1.8 Holografie

Holografie je forma záznamu obrazu předmětu, která umožňuje zaznamenat jak fázi, tak amplitudu vlny odražené od předmětu. To znamená, že pomocí holografie dokážeme zachytit trojrozměrnou strukturu objektů odrážejících a propouštějících světlo (transparentních objektů), na rozdíl od fotografie nebo záznamu kamerou, které dovolují zachytit pouze dvojrozměrný obraz předmětu. Princip je založen na interferenci vysoce koherentního světla.

Svazek koherentních světelných vln, který vyzařuje laser a který je dostatečně široký, aby mohl zaznamenat úplně celý předmět, se pomocí optických prostředků (např. dvojlovným krystalem) rozdělí na svazek osvětlovací a svazek referenční (Obr. 10). Po dopadu a následném odrazu osvětlovacího svazku od snímaného předmětu vzniká objektový svazek, jenž nese informaci o struktuře předmětu. Tyto informace se zaznamenají v záznamovém médiu (např. fotografický film, polymer), díky referenčnímu svazku, jenž v místě obrazového nosiče interferuje s obrazovým svazkem. Po expozici se záznamové médium chemicky zpracuje, čímž se změní propustnost média v závislosti na získaném interferenčním obrazci a dostáváme hologram.

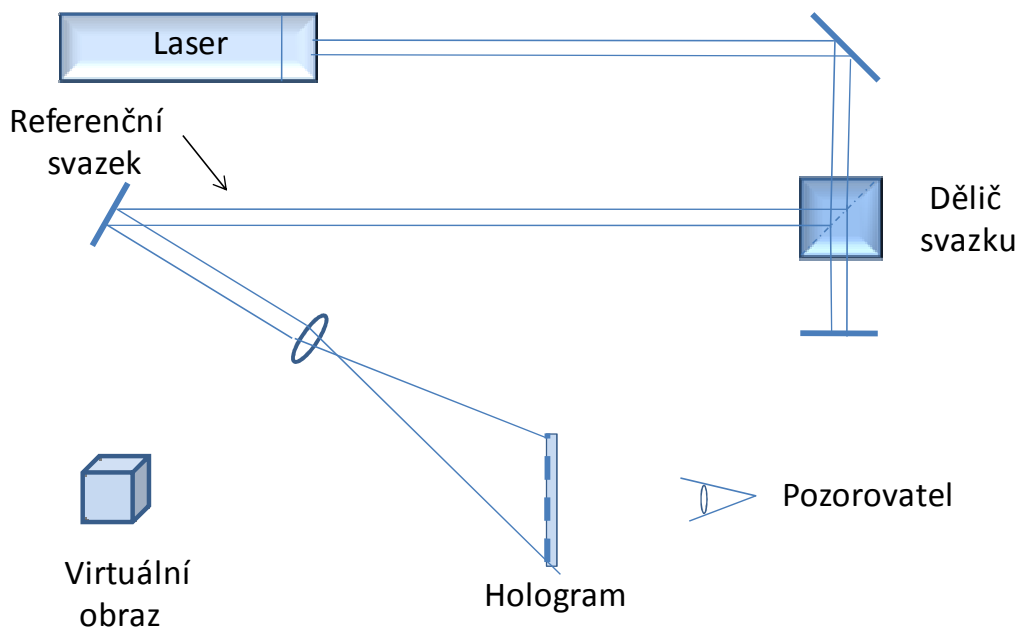


Obr. 10: Záznam hologramu

Přímý pohled na vzniklý hologram nejeví žádnou spojitost se zaznamenaným objektem, viz Obr. 13b, kde zaznamenaným objektem byla figurka slona. Informace o každém bodu zaznamenávaného předmětu je přitom díky vlastnostem světla „rozptýlena“ v celé ploše hologramu. Proto je možné i z pouhého úlomku holografické desky rekonstruovat celý obraz. Kvalita takto rekonstruovaného obrazu je úměrná ploše úlomku holografické desky. Fakt, že informace o každém bodu zaznamenávaného předmětu je zachycena v celé ploše hologramu vyplývá z toho, že světlo se šíří z daného bodu předmětu všemi směry.

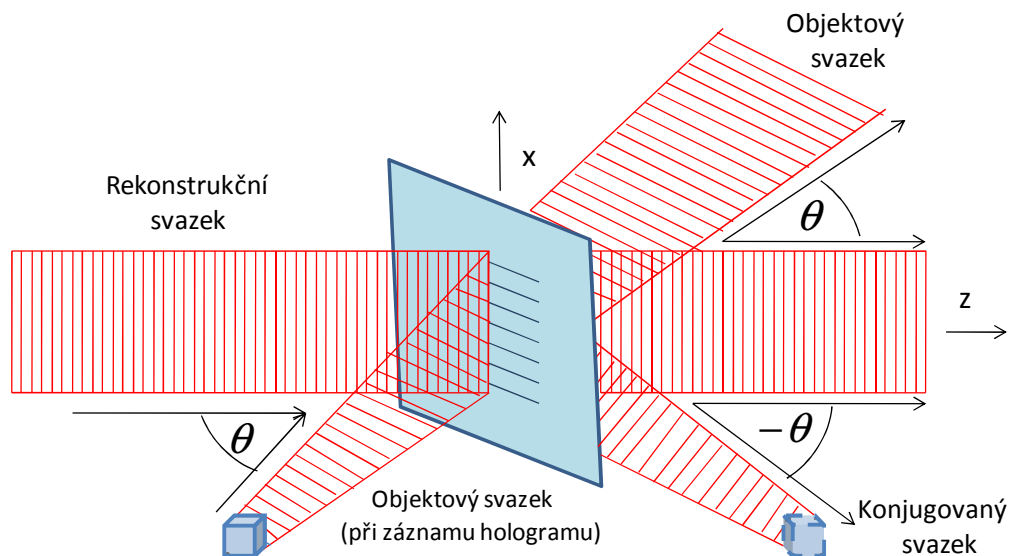
Obraz předmětu lze získat teprve jeho rekonstrukcí (Obr. 11) tak, že hologram osvítíme svazkem rekonstrukčním. Ten je ekvivalentní s referenčním svazkem a dopadá na hologram pod stejným úhlem, pod kterým dopadal na záznamové médium referenční svazek při

záznamu hologramu. Difrakcí rekonstrukčního svazku na hologramu se vytváří světelné pole (viz Obr. 12), to je složeno z objektového svazku, které oko vnímá jako prostorový obraz původního objektu ve směru, v němž se tento předmět nacházel. Dále je pole složeno z referenčního a konjugovaného svazku, tedy svazku opačného od objektového.



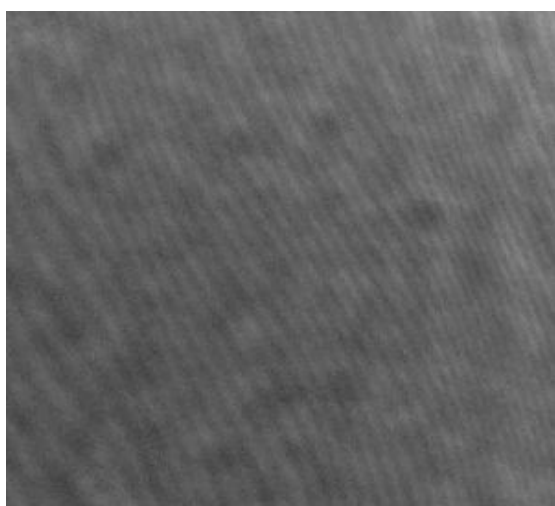
Obr. 11: Rekonstrukce hologramu

Hologram můžeme sestavit i tak, že svazky dopadají na opačné strany záznamového média (reflexní hologram). Tyto hologramy lze pozorovat v přirozeném světle. Na tomto principu jsou založeny některé odznaky, ochrana kreditních karet a dokladů, atp. Dále můžeme hologram zaznamenat amplitudově nebo fázově. Amplitudový záznam je založen na principu intenzity světla dopadajícího na záznamové médium. Při záznamu se mění amplitudová propustnost média v závislosti na osvitu. Film tedy pohlcuje více či méně

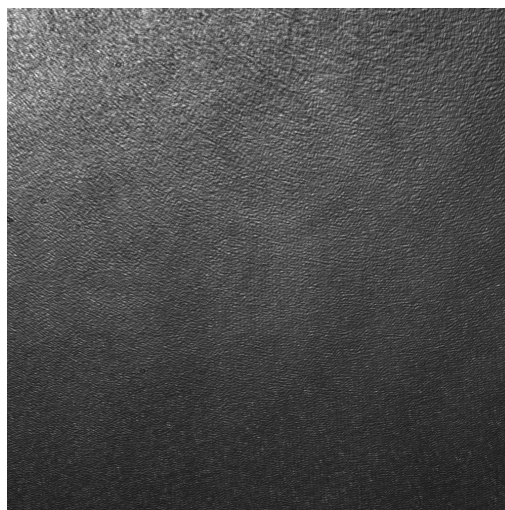


Obr. 12: Rekonstruovaný svazek

dopadající světlo podle jeho intenzity. Takto vytvořený hologram má menší difrakční účinnost, nežli hologram vytvořený fázovým záznamem. Při fázovém záznamu se osvitom média mění jeho vlastnosti, které mají vliv na fázi světelné vlny procházející tímto médiem, jako je např. prostorová modulace indexu lomu nebo modulace dráhy procházející vlny, která je způsobena změnou tloušťky vrstvy média (povrchový reliéf).



a)



b)

Obr. 13: a) hologram zaznamenaný použitím fotografického filmu

b) hologram při záznamu na CCD

1.9 Digitální holografie

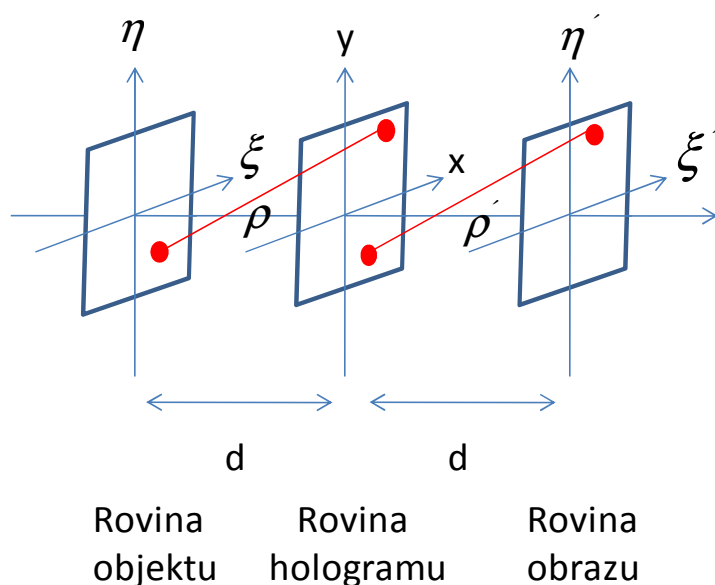
Digitální holografie navazuje na klasickou holografii. Jako záznamové médium je většinou použita CCD kamera. Hologram je digitálně zpracován a vyhodnocen, díky tomu je možné numerickou rekonstrukcí získat obraz zaznamenaného objektu.

Referenční svazek a svazek odražený od objektu spolu interferují na povrchu CCD. Objekt je všeobecně trojrozměrné těleso s různými odrazovými plochami, umístěnými od roviny CCD ve vzdálenosti d . V optické rekonstrukci se virtuální obraz jeví na místě originálního objektu ve stejné vzdálenosti d , ale opačně orientován. Difrakce světelné vlny na hologramu, který je umístěn kolmo k dopadající vlně je popsán pomocí Fresnel-Kirchhofova integrálu (20), viz kapitola 1.6.

$$\Gamma(\xi', \eta') = \frac{i}{\lambda} \iint_{-\infty-\infty}^{\infty} h(x, y) E_R(x, y) \frac{\exp(-i \frac{2\pi}{\lambda} \rho')}{\rho'} dx dy \quad (20)$$

$$\rho' = \sqrt{(x - \xi')^2 + (y - \eta')^2 + d^2} \quad (21)$$

E_R je referenční vlna, díky které rekonstruuujeme výsledný obraz, $h(x, y)$ je funkce hologramu na pozici x, y a ρ' je vzdálenost mezi bodem z roviny hologramu a bodem na rekonstruované rovině viz Obr. 14.



Obr. 14: Souřadnicový systém pro numerickou rekonstrukci hologramu

Rovnice (20) je základ pro numerickou rekonstrukci hologramu (viz kapitola 2.3). Rekonstruovaný obraz, tedy vlnové pole $\Gamma(\xi', \eta')$ je komplexní funkce, lze z ní vypočítat intenzitu i fázi světelné vlny. Difrakční model je vypočítán ve vzdálenosti d od CCD plochy. K tomu, abychom vytvořili skutečný obraz, využijeme konjugovaný svazek E_R^* (viz Obr. 12), ten dosadíme namísto referenční vlny E_R v rovnici (20). Skutečný obraz se jeví na pozici, kde byl objekt umístěn během záznamu. Ze získaných dat je také možné sestavit 3D model objektu.

1.9.1 CCD kamera

Zkratka CCD pochází z anglického Charge-Coupled Device, což v překladu znamená zařízení s vázanými náboji. CCD je elektronické zařízení používané k vytvoření obrazu předmětu, uložení informací nebo převodu elektrického náboje. Dnes je nejčastěji využíván k záznamu obrazu, CCD jsou použita jako zobrazovací zařízení v elektronických kamerách a skenerech. Pro digitální holografii jsou důležité pozdější architektury CCD, ty přispěli k velké kvalitě záznamu hologramů.

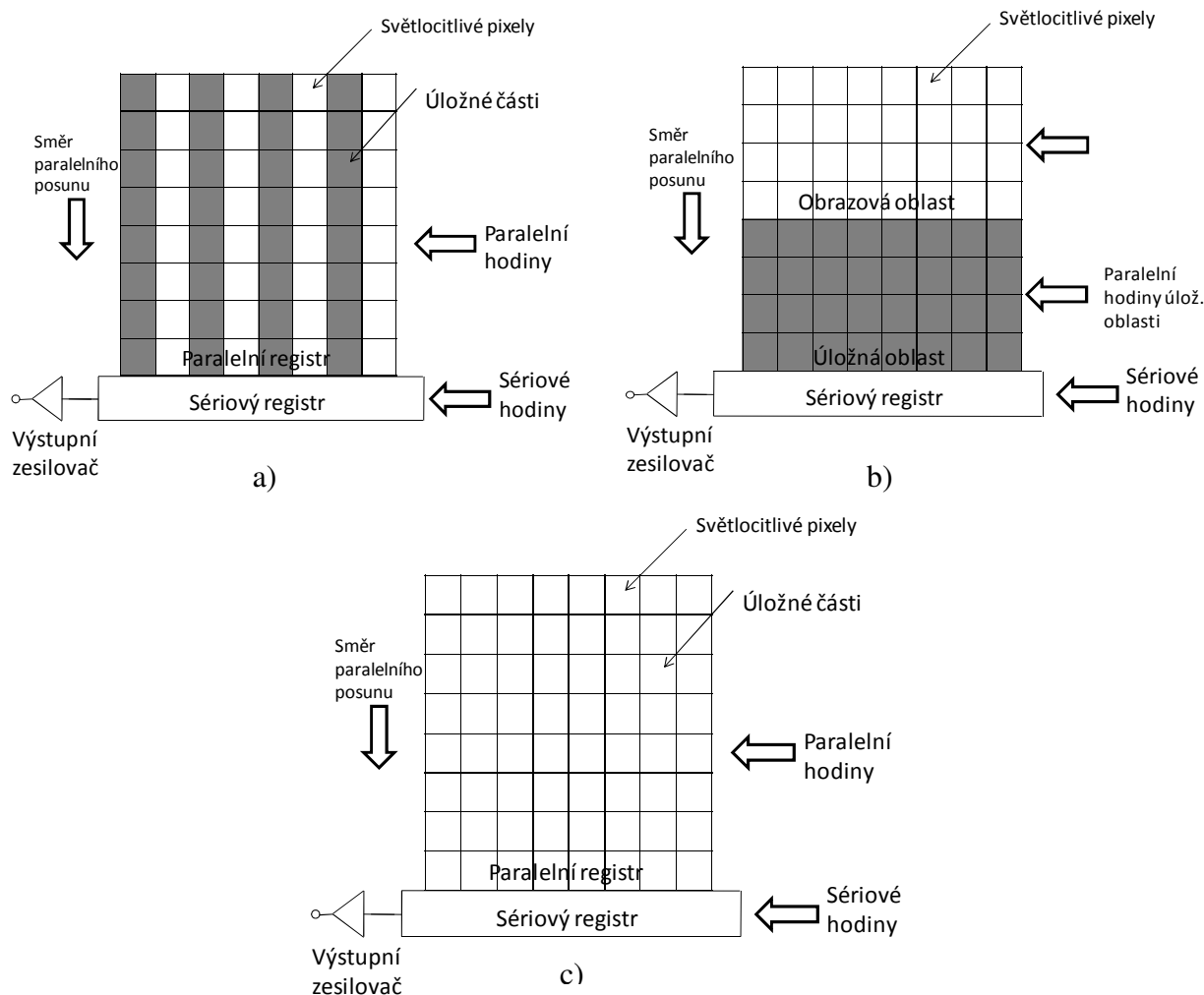
Zobrazování pomocí CCD je provedeno ve třech krocích:

1. Světelná expozice: Vnitřním fotoefektem se oddělí náboje dopadajícího světla. Tento efekt převádí světlo na elektrický náboj v jednotlivých detektorech zvaných pixely.
2. Přenos náboje: Funkce převodu náboje přesune balíčky energie (náboje) uvnitř polovodiče (silikonu) do paměťových členů.
3. Převod náboje na elektrické napětí: Matice kondenzátorů paměťových částí převádí přenesený náboj na elektrické napětí. Zesilovač upraví elektrické napětí na požadovanou výstupní hodnotu.

Tří základní architektury CCD se nazývají full-frame transfer, frame-transfer a interline transfer. Interline-transfer CCD se skládá z pruhovaného vzoru světlocitlivých detektorů (fotodiod) a oddělených úložných částí, které buď na světlo nereagují, nebo jsou před ním chráněny (viz Obr. 15a). Balíčky náboje, které jsou vytvořeny ve světlocitlivých axelech, jsou posunuty do sousední úložné části pomocí paralelních hodin. Poté náboje v těchto částích jsou posunuty řádek po řádku do sériového registru. Tento registr převede balíčky náboje na náboj do napěťového převaděče se zesilovačem, který formuje výstupní signál. Největší nevýhoda této architektury je v oddělení úložných a světlocitlivých částí.

Frame-transfer CCD má také oddělené oblasti pro světelnou konverzi a pro ukládání. Tyto oblasti nejsou uspořádány do pruhů, ale rozděleny do dvou odlišných bloků (viz Obr. 15b). Myšlenka je v přesunu zachycené scény z fotocitlivé obrazové oblasti velmi rychle do úložné oblasti. Čtení hodnot z úložné oblasti je provedeno podobně jako u interline-transfer CCD.

Full-frame CCD má jednodušší architekturu, na rozdíl od interline a frame-full nemají oddělené úložné oblasti (viz Obr.15c). Celá sensorová oblast je světlocitlivá. Fotony osvětlujícího paprsku jsou převedeny do „balíčků“ náboje. Celé řady těchto „balíčků“ jsou posunuty souběžně do sériového registru, následně posunuty na výstup jako sériový proud dat. Proces se opakuje, dokud všechny řady nejsou převedeny ven z chipu. Paralelní registr je používán jak pro obrazovou detekci, tak pro výčet dat, k ochraně spojitosti scény je zapotřebí mechanická clona. Full-frame CCD mají vyšší rozlišení a cena je v porovnání s ostatními architekturami nižší.



Obr. 15: Architektury CCD

1.9.2 Digitální holografie a CCD

V podstatě všechny tři typy CCD uvedené v předchozí kapitole jsou vhodné pro digitální holografii. Full-frame CCD má výhodu v tom, že doba expozice může být nastavena podle požadavků specifických aplikací. Dokonce je možná doba expozice v řádu sekund. Nicméně je-li použita mechanická clona, limituje počet hologramů, které mohou být nahrány za jednu sekundu (tzv. frame rate). Clona také může zapříčinit přenos mechanických vibrací do uspořádání, ty zhoršují kontrast zaznamenaného hologramu. Výhoda interline CCD je v elektronické cloně, kterou jsou tyto kamery vybaveny. Elektronická clona dovoluje velmi vysokou frame rate a vibrace vzniklé clonou jsou daleko menší nežli u mechanické clony.

CCD používané pro záznam hologramu musí zaznamenat interferenční obrazec vzniklý superpozicí referenční vlny s vlnami odraženými od různých bodů objektu. Maximální tzv. prostorová frekvence (četnost interferenčních proužků) je určena maximálním úhlem θ_{\max} mezi těmito vlnami.

$$f_{\max} = \frac{2}{\lambda} \sin \frac{\theta_{\max}}{2} \quad (22)$$

Fotografická emulze používaná v klasické holografii dosahuje rozlišení až 5000 interferenčních čar na mm (Lp/mm), použitím těchto materiálů může maximální úhel mezi referenční a objektovou vlnou dosahovat až 180° a i přesto nedojde ke ztrátě „informací“ o předmětu, uložených v interferenčním obrazci. Zato při záznamu na CCD jsme omezeni velikostí jednoho pixelu CCD kamery, ta se pohybuje kolem $\Delta x \approx 5\mu m$. Maximální prostorová frekvence interferenčních čar, kterou je CCD schopné zaznamenat beze ztráty „informace“, je vypočítaná podle vztahu (23) a pohybuje se kolem 100 Lp/mm . Ztrátou informace je zde myšlen případ, kdy prostorová frekvence je vyšší nežli rozlišovací schopnost záznamového média, např. u CCD by to znamenalo, že na jeden pixel přísluší více interferenčních čar a tím by samozřejmě došlo ke zkreslení zaznamenaného interferenčního obrazce.

$$f_{\max} = \frac{1}{2\Delta x} \quad (23)$$

Kombinací rovnic (22) a (23) můžeme vyjádřit maximální úhel mezi referenční a objektovou vlnou, při záznamu hologramu na CCD o rozměrech pixelu $\Delta x \times \Delta x \dots$

$$\theta_{\max} = 2 \arcsin \left(\frac{\lambda}{4\Delta x} \right) \approx \frac{\lambda}{2\Delta x}. \quad (24)$$

Důležitá data vybraných CCD kamer vhodných pro digitální holografii jsou uvedeny v Tabulce 1.

Citlivost CCD kamer je typicky v rozsahu $10^{-4} J/m^2$ do $10^{-3} J/m^2$, ta je lepší než citlivost fotografické emulze používané v klasické holografii. Šířka spektra rozlišitelného kamerou dosahuje přibližně hodnot od $400nm$ do $1000nm$. Většina komerčně dostupných CCD kamer je vybavena filtrem, který omezuje citlivost kamery na rozsah vlnových délek viditelného světla.

Tabulka. 1: Důležitá data vybraných CCD kamer

Kamera	Typ chipu	Počet pixelů	Velikost pixelu [μm^2]	Frame rate	Dynamický rozsah	θ_{\max} pro $\lambda = 633nm$
Roper Sci. MegaPlus 1.4i	FT	1317 x 1035	6.8 x 6.8	6.9	8 bit	2.7°
Roper Sci. MegaPlus 16.8i	FT	4096 x 4096	9 x 9	0.47	8 bit	2.0°
Roper Sci. MegaPlus 4.0	IT	2048 x 2048	7.4 x 7.4	30	8 nebo 12 bit	2.45°
Basler A641f	PSI	1624 x 1236	4.4 x 4.4	14	12 bit	4.12°
AVT PIKE F-032B/C	PS	640 x 480	7.4 x 7.4	208	8 - 16 bit	2.45°

FT: full-frame, IT: interline-transfer, PSI: postupné snímání (IT), PS: postupné snímání

V klasické holografii by měl být poměr intenzit mezi referenční a objektovou vlnou v rozsahu 5:1 až 10:1, abychom se vyvarovali nelineárních efektů způsobených záznamovým médii. Nicméně z interferenčních rovnic je známo, že maximální kontrast interferenčních vzorů je dosažen tehdy, je-li poměr intenzit 1:1. CCD mají o mnoho lepší linearitu, co se týče expoziční křivky, nežli např. fotografická emulze. Proto poměr intenzit mezi referenčním a objektovým svazkem při záznamu na CCD, by měl být nastaven vhodně k 1:1. Expoziční energie dopadající na CCD může být řízena variabilní dobou expozice. To je ve většině případů splněno elektronickou nebo mechanickou kamerovou závěrkou.

CCD kamery mají typicky dynamický rozsah 8 bitů (256 hodnot šedi) nebo vyšší. To je srovnatelné s rozsahem fotografických materiálů a plně dostačující pro záznam hologramu.

Numerická rekonstrukce digitálních hologramů vyžaduje určitý počet pixelů nasnímaného obrazu, ten by měl být $2^N \times 2^N$ kde N je přirozené číslo (např. 1024 x 1024 pixelů). Počet

pixelů některých kamer uvedených v Tabulce 1. se od tohoto pravidla liší. Jestli počet pixelů je např. 1317 x 1035 jen 1024 x 1024 pixelů je využito pro rekonstrukci. V případě, že je počet o něco málo nižší než 2^N (např. 1008 x 1018) je možné přidat „umělé“ pixely s hodnotou šedi nula (černá) k záznamovému hologramu, dokud není dosažen počet pixelů $2^N \times 2^N$. Toto „doplnění nulami“ nedeformuje výpočet, pouze zapříčiní vyhlazení interpolace rekonstruovaného obrazu.

1.9.3 Uspořádání pro záznam digitálního hologramu (set-up)

V této kapitole si ukážeme typická uspořádání používaná v digitální holografii. Výhody a nevýhody některých uspořádání jsou uvedeny v kapitole 3. Na Obr. 16a je principiálně znázorněno uspořádání, kde referenční svazek dopadá kolmo na CCD a objekt je umístěn nesymetricky vzhledem k ose procházející středem CCD. Maximální úhel mezi svazkem vycházejícím z rohu čtvercového objektu s délkou stěny L do opačného rohu CCD s délkou stěny $N\Delta x$ je

$$\theta_{\max} \approx \frac{x}{d_{\min}} = \frac{\sqrt{\frac{5}{4}}(L + N\Delta x)}{d_{\min}}, \quad (25)$$

kde minimální objektová vzdálenost d_{\min} je dána vztahem

$$d_{\min} = \sqrt{\frac{5}{4}} \frac{2\Delta x}{\lambda} (L + N\Delta x) = \sqrt{5} \frac{\Delta x}{\lambda} (L + N\Delta x). \quad (26)$$

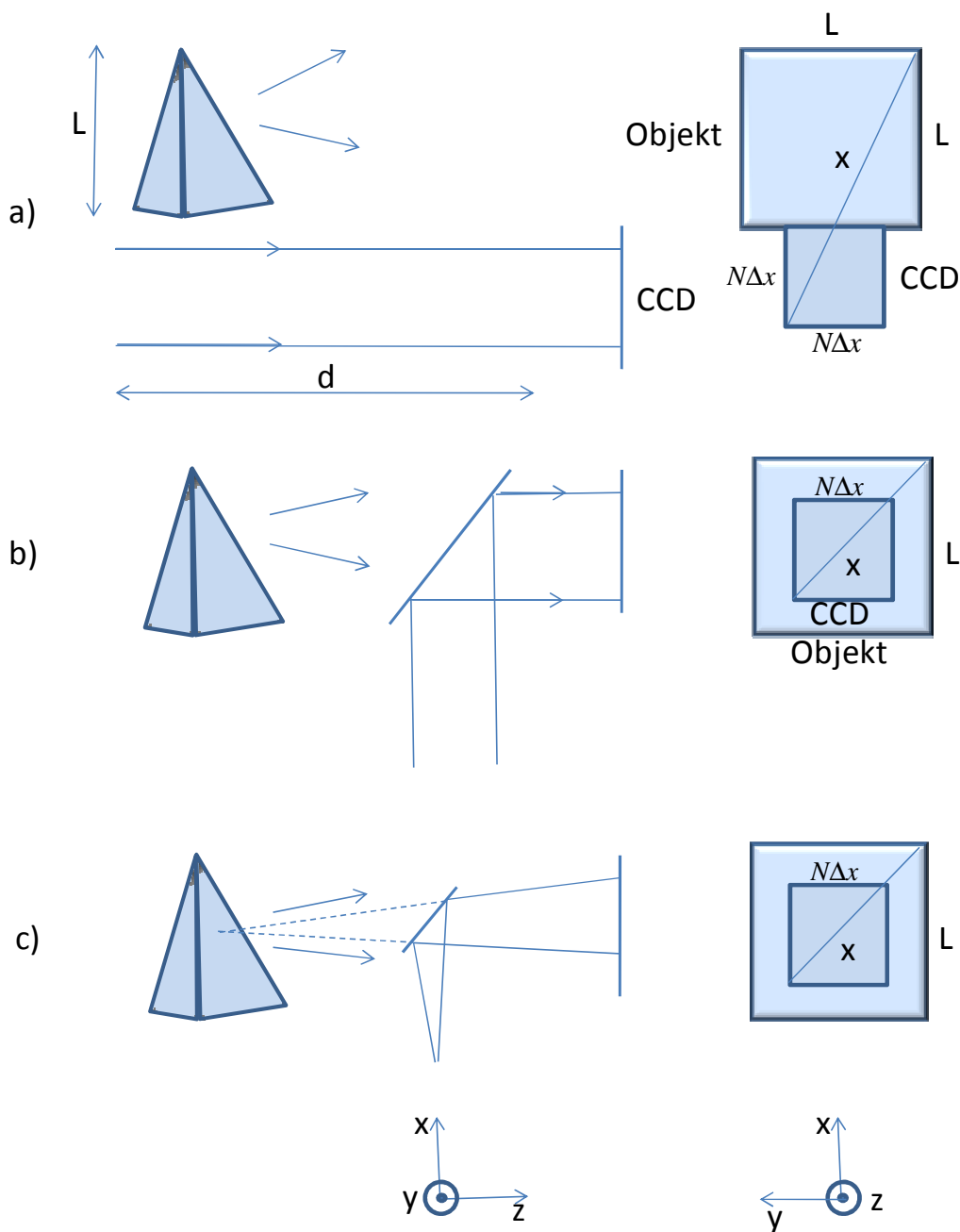
Na Obr. 16b je znázorněno nejpoužívanější uspořádání pro záznam digitálního hologramu. Referenční svazek je spojen s objektovým svazkem procházejícím skrz dělič svazku. To dovolí umístění objektu symetricky vzhledem k ose CCD. Minimální vzdálenost objektu při tomto uspořádání je

$$d_{\min} \approx \frac{x}{\theta_{\max}} = \sqrt{2} \frac{\Delta x}{\lambda} (L + N\Delta x). \quad (27)$$

Nicméně stejnosměrná složka (viz kapitola 2.3) vzniklá nulovou difrakcí referenční vlny na hologramu je ve středu rekonstruovaného obrazu. Obrázek 16c ukazuje uspořádání pro Fourierovu holografii bez optických čoček. Kulová referenční vlna spojena přes dělič svazku tak, aby byl bodový zdroj referenčního svazku v rovině objektové. Minimální objektová vzdálenost je

$$d_{\min} = \sqrt{2} \frac{\Delta x}{\lambda} L. \quad (28)$$

S tímto uspořádáním mohou být zvoleny menší objektové vzdálenosti.

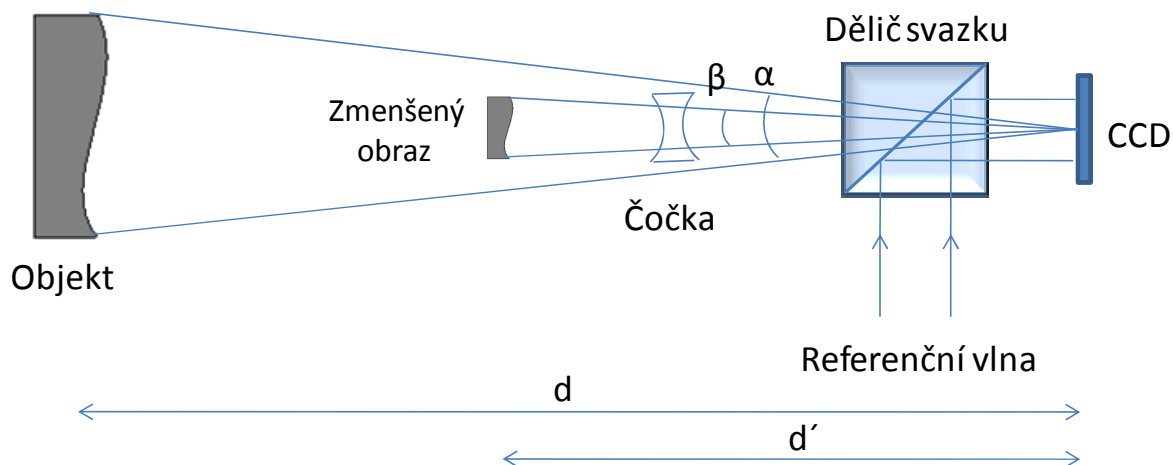


Obr. 16: Principiální uspořádání pro digitální záznam hologramu:

- a) objekt je umístěn nesymetricky vzhledem k CCD
- b) referenční svazek je spojen s objektovým procházejícím skrz dělič svazku
- c) Fourierova holografie

Každé uspořádání by mělo být sestaveno tak, aby prostorová frekvence interferenčních čar určená úhlem θ mezi referenčním a objektovým svazkem, byla vhodně přizpůsobena vzhledem k rozlišení CCD (viz kapitola 1.9.2), tedy nejlépe tak, že na jeden pixel přísluší jeden interferenční proužek. Jestli dosáhneme příliš vysoké prostorové frekvence oproti rozlišení CCD, kontrast celého hologramu se snižuje nebo v extrémním případě zmizí úplně. Proto by měly být požadavky prostorové frekvence dodrženy v každém případě. Nezbytná je také stabilní optická sestava, jakákoliv změna v optické dráze mezi interferujícími vlnami znamená změnu kontrastu výsledného hologramu. V praxi by neměly změny přesáhnout 1/4 nejlépe 1/10 vlnové délky během expozice.

Jestli bude zaznamenáván pomocí CCD objekt s rozměry většími než několik centimetrů, minimální záznamová vzdálenost d_{\min} se zvyšuje k několika metrům. To v praxi není proveditelné. Proto bylo navrženo uspořádání k redukování velikosti obrazu objektu. Příklad takového uspořádání je na Obr. 17. Rozptylná čočka je umístěna mezi objektem a CCD. Čočka generuje zmenšený virtuální obraz ve vzdálenosti d' . Vlnové pole vzniklé tímto virtuálním obrazem je superponované na referenční vlnu, následně je toto výsledné pole zaznamenáno. Maximální prostorová frekvence je nižší ve srovnání s hologramem, který je zaznamenán bez redukování velikosti objektu.

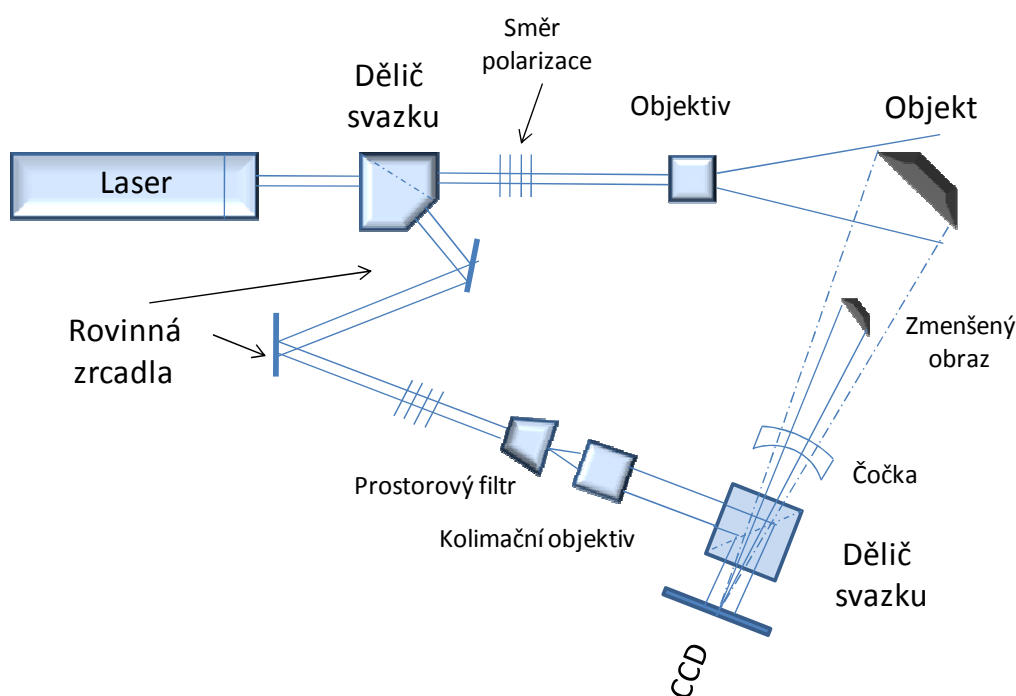


Obr. 17: Principiální uspořádání pro záznam větších objektů

2 Experimentální část

2.1 Uspořádání pro záznam a rekonstrukci digitálního hologramu

Předmět [1], který zaznamenáváme je figurka rozměrů 3 x 3cm. CCD kamera Basler A641f (viz Tabulka. 1) má rozměry pixelů $4.4 \times 4.4 \mu m^2$, úhel mezi referenčním a objektovým svazkem θ_{\max} , při použití laseru LGK 7665P s vlnovou délkou 632,8nm, by měl tedy být maximálně 4.12° . Použijeme uspořádání principiálně znázorněném na Obr. 16b, kde referenční svazek je spojen s objektovým procházejícím skrz dělič svazku a objekt je umístěn na ose s děličem a CCD. Minimální vzdálenost předmětu od CCD je podle vztahu (27) 33cm. Vložení rozptylné (meniskové) čočky [9] mezi dělič svazku a CCD (viz Obr. 17) vytvoříme zmenšený virtuální obraz předmětu a díky tomu je snížena také minimální vzdálenost předmětu od CCD a máme tak větší toleranci při dodržení maximálního úhlu θ_{\max} . Rozdíl drah referenční a objektové vlny (dělič svazku \rightarrow CCD) nesmí překročit koherenční délku použitého laseru, ta je 20,72cm, nejlépe je-li rozdíl drah nulový nebo menší jak desetina koherenční délky. Snažíme se tedy, aby si tyto dráhy byly co nejvíce podobné. Intenzity těchto svazků v CCD rovině by měly být v poměru 1:1. Doplněním ostatních optických komponent potřebných k záznamu hologramu vznikne upořádání, které je znázorněné na Obr. 18.



Obr. 18: Schéma prvního uspořádání pro záznam digitálního hologramu

2.1.1 Použité komponenty pro první uspořádání

Zdroj koherentního záření [2]

Jako zdroj byl použit laser LGK 7665P (viz kapitola 1.7). Výstupní vlna je elipticky polarizovaná s poměrem velikostí poloos 500:1 a její vlnová délka je 632,8nm. Maximální výkon laseru je 15mW. Koherenční délka laseru je 20,72cm.

Dělič svazku [3,4]

Použitý dělič laserového svazku je dvojlomný krystalový dělič, kde lineárně polarizované světlo se průchodem krystalem rozdělí na dvě světelné vlny, které mají vůči sobě kolmou polarizaci. Úhel při průchodu rozhraním je nastaven tak, aby se jeden svazek úplně odrazil a druhý tímto rozhraním prošel. Poměr intenzit rozdělených svazků je regulován pomocí půlvlnové destičky, ta je umístěna před krystalem. Jejím otáčením se mění rovina polarizace vstupujícího svazku, tím se mění velikosti kolmých složek polarizace rozdělených vln a tudíž také poměr intenzit vystupujících svazků. Interferenční jev nenastává v případě, že jsou vlny vůči sobě kolmo polarizované, pomocí destiček tedy nastavíme stejnou rovinu polarizace obou výstupních svazků. Dělič může být upraven tak, že výstupní vlny svírají úhel 90° [3] nebo např. 45° [4].

Prostorový filtr [5]

Prostorový filtr je prvek odstraňující vady, které zhoršují vnitřní strukturu svazku. Tyto vady způsobující lokální změny intenzity svazku, jsou převážně difrakčního a interferenčního charakteru. Důvodem mohou být částičky, které ulpěly na povrchu optických prvků, bublinkách ve skle různých optických prvků. Základními prvky prostorového filtru jsou mikroskopový objektiv, který způsobuje rozšíření svazku a dírková clona, která má možnost pohybu ve dvou směrech na sebe kolmých. Dírková clona brání průchodu více než jen jednomu interferenčnímu maximu a tudíž nedochází k výše zmíněným jevům. Abychom mohli svazek správně vyfiltrovat, musíme zvolit správnou velikost clonky a nastavit její pozici. Výsledkem je nekolimovaný svazek bez nežádoucích prostorových frekvencí.

Mikroskopový objektiv [6]

Objektiv je součástí teleskopické optické soustavy, která vstupní svazek rozšíří a následně kolimuje. Kolimovaný svazek je takový svazek, který má rovnoběžné paprsky. Pro gaussovský svazek není možné dosáhnout kolimovaného stavu, přesto však teleskopická kombinace čoček dovoluje získat svazek víceméně kolimovaný, alespoň v tom smyslu, že má daleko větší průřez než vstupní svazek a velmi malou rozbíhavost. Teleskopická soustava může být sestavena prostorovým filtrem, který je umístěn před objektivem.

Rovinné zrcadlo [7]

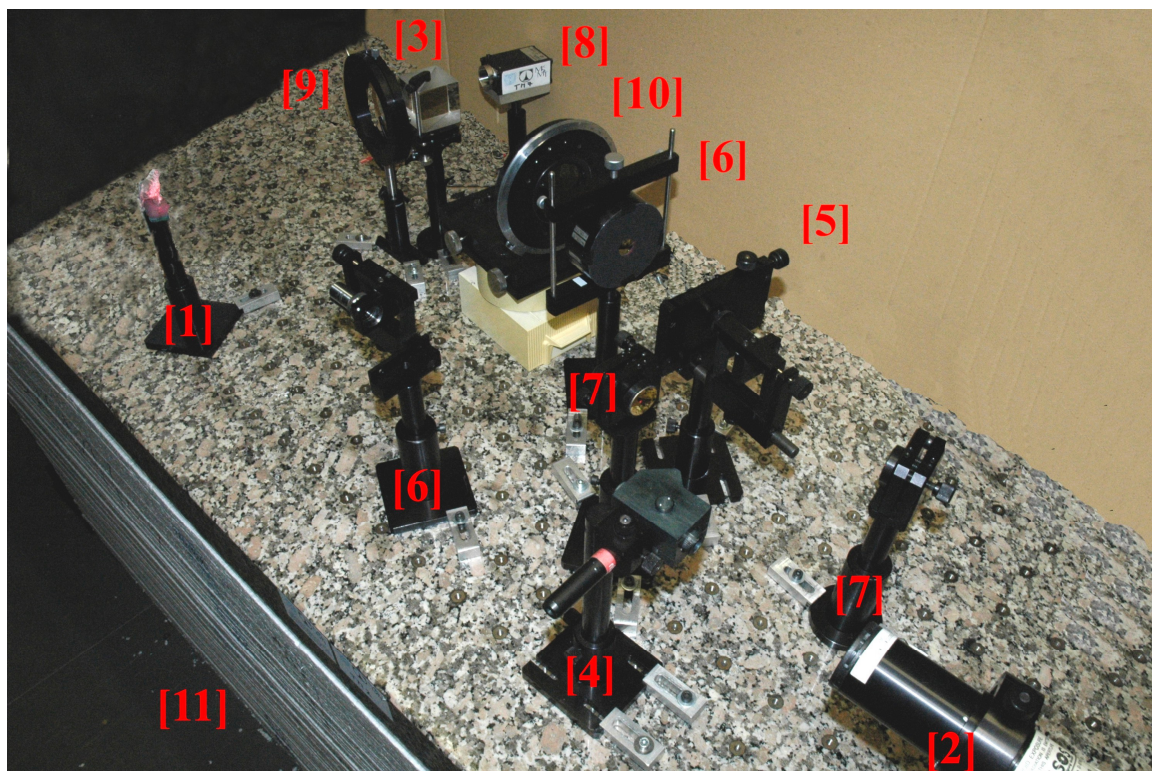
Dokonale vyleštěná skleněná, pokovená plocha s velkou odrazivostí a v našem případě možností doladění horizontálního i vertikálního směru odraženého paprsku.

CCD kamera [8]

Použitá kamera má označení Basler A614f, důležitá data jsou uvedena v Tabulce 1.

Optický stůl [11]

Plocha uzpůsobená k sestavování a uchycování optických prvků. Uchycení je realizováno pomocí pomocných držáčků a šroubků. Po celé ploše stolu jsou rozmístěny v pravidelných intervalech závity pro uchycení držáčků. Výška optického stolu je limitována bezpečnostními předpisy, aby paprsek nebyl v blízkosti roviny očí a popř. je nezasáhl. Jelikož většina optických měření je náchylná na mechanické chvění, musí být optický stůl dobře odizolovaný. Zvláště holografické měření s dlouhou expozicí jsou na sebemenší chvění náchylné. V našem případě slouží k odtlumení polystyrénové desky.

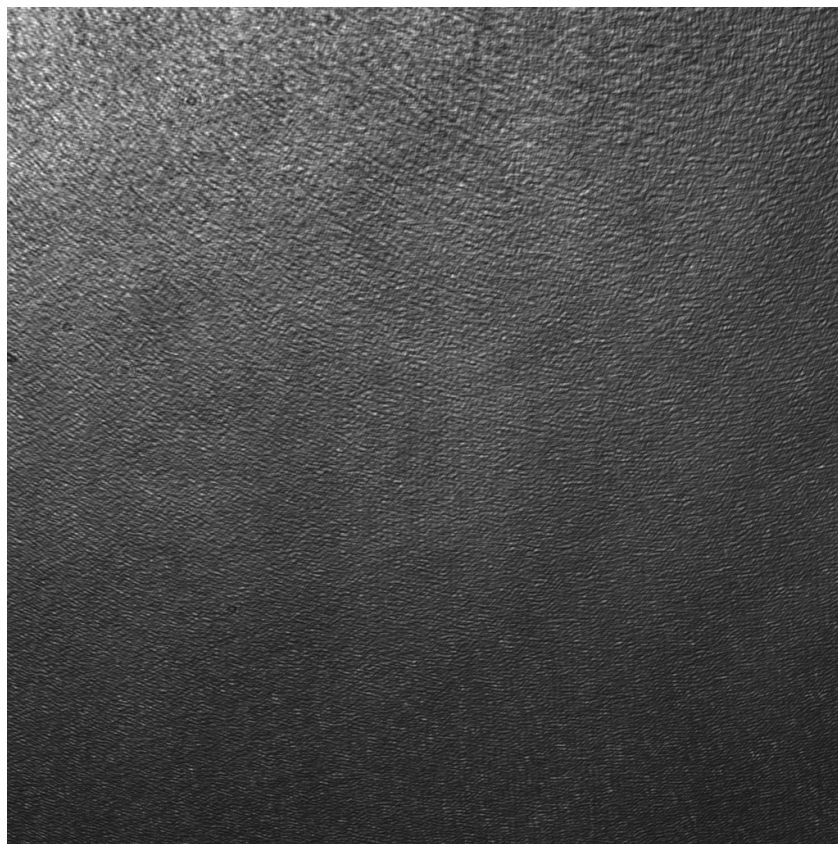


Obr. 19: První uspořádání pro záznam a rekonstrukci digitálního hologramu

2.1.2 Postup při záznamu digitálního hologramu

Po sestavení uspořádání je zapotřebí upravit rozdělené svazky děličem [4] co nejvhodněji pro záznam hologramu na CCD. Půlvlnovými destičkami na děliči svazku nastavíme shodnou polarizaci obou výstupních svazků. Seřídíme prostorové filtry. Objektiv je nastaven tak, aby clonka byla ve vzdálenosti větší, než je jeho ohnisková vzdálenost. Posuvem objektivu ke clonce je možné pozorovat na stínítku tzv. Youngovy proužky, jejichž případné vychýlení z optické osy je doladěno posuvem clonky pomocí mikrometrických šroubů. Prostorový filtr je seřizen, když vymizí soustava interferenčních proužků kolem stopy a na stínítku je vidět čistý svazek. Pro kontrolu kolimovaného svazku použijeme planparalelní desku, kterou umístíme za teleskopickou soustavu [5,6]. Svazek odražený od planparalelní desky zobrazíme na stínítku, zachycený obraz tvoří překrývající se stopy svazku. Teleskopickou soustavu upravujeme tak dlouho, dokud v průniku těchto stop nenalezneme náznak interference. Tímto způsobem můžeme dosáhnout svazku téměř kolimovaného. Dále je zapotřebí zkontrolovat úhel θ mezi referenčním a objektovým svazkem. Namísto předmětu [1] vložíme rovinné zrcadlo, odraženým svazkem budeme moci částečně reprezentovat objektový svazek. Čočku [9] umístíme před dělič tak, aby obrazový svazek dopadal do středu čočky. Do děliče [3] teď tedy dopadá rozptýlený obrazový a kolimovaný referenční svazek (viz Obr. 18). Na pozici

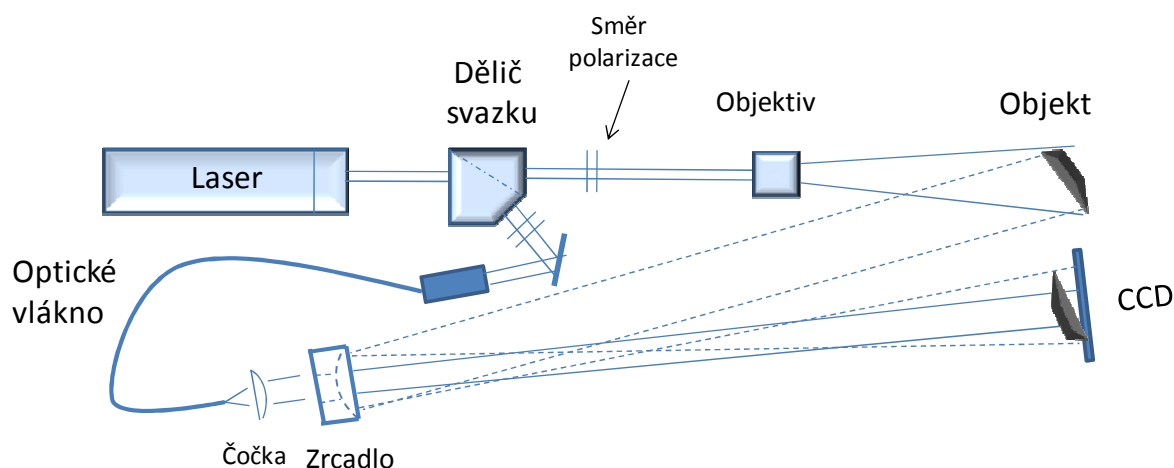
CCD kamery [8] umístíme stínítko, na kterém můžeme sledovat rozbíhavost objektového a referenčního svazku. Pokud svazky nesměřují do stejného bodu, upravíme jejich rozbíhavost natočením zrcadla, které referenční svazek soustředí do děliče [3], nebo natočením samotného děliče. Dále postupně vzdalujeme stínítko a svazky se snažíme co nejvíce srovnat. Podle zobrazovací rovnice čočky se obraz předmětu zobrazí 13,6cm od středu čočky (ohnisková vzdálenost čočky je 100,2mm, vzdálenost předmětu od čočky $d = 38\text{cm}$). CCD tedy umístíme 13,6cm za čočkou. Předmět [1] vrátíme na stojan. Měřičem výkonu světla (Labmaster) změříme a půlvlnou destičkou nastavíme intenzity paprsků vstupujících do děliče [3]. Poměr intenzit by měl být, co nejblíže k 1:1 (viz kapitola 1.9.2). Pro lepší regulaci poměru intenzit je vhodné referenční svazek upravit polarizátorem [10], kromě změny intenzity může změnit směr polarizace, ten půlvlnovou destičkou na děliči [4] nastavíme na původní směr před vložením polarizátoru. Následně sejmeme digitální hologram pomocí počítačové aplikace (Measurement and automation explorer). Rozměr sejmutého hologramu je 1600 x 1200 pixelů, pro numerickou rekonstrukci je vhodné oříznout obraz na rozměr 1024 x 1024 pixelů. Oříznutý digitální hologram je na Obr. 20.



Obr. 20: Nasnímaný digitální hologram 1024 x 1024 pixelů

2.2 Druhé uspořádání pro záznam a rekonstrukci digitálního hologramu

Pomocí speciálně vyrobeného zrcadla [1] Cassegrainova typu jsme schopni objektový svazek vést společně s referenčním svazkem téměř pod nulovým úhlem θ . Referenční svazek je veden optickým vláknem [2] a štěrbinou ve středu zrcadla viz Obr. 21. Zaznamenávaný předmět [3] je kovová destička o rozměrech $4 \times 3 \text{ cm}$. Stejně jako u předchozího uspořádání nesmí být rozdíl drah referenční a objektové vlny (dělič svazku \rightarrow CCD) větší nežli desetina koherenční délky použitého laseru, ta je 20,72 cm. Polarizace těchto vln musí být shodná a intenzita referenčního a objektového svazku v rovině CCD by měla být v poměru 1:1.

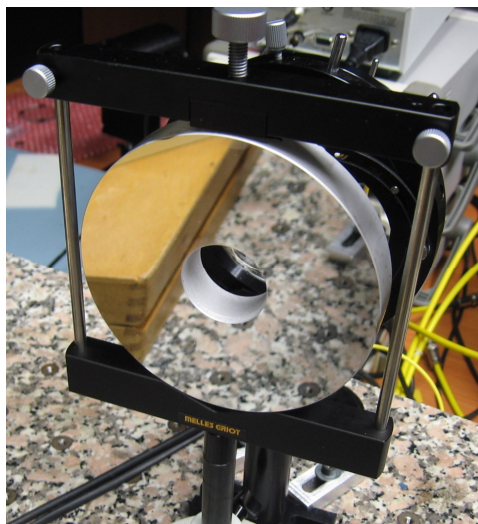


Obr. 21: Schéma druhého uspořádání pro záznam digitálního hologramu

2.2.1 Použité komponenty pro druhé uspořádání

Zrcadlo [1]

Vyduté zrcadlo Cassegrainova typu s dokonale vyleštěnou kovovou plochou a velkou odrazivostí. Uprostřed zrcadla je otvor, kterým může procházet referenční svazek (viz Obr. 22). Poloměr křivosti zrcadla R je 1298mm.



Obr. 22: Zrcadlo Cassegrainova typu

Optické vlákno [2]

Optické vlákno je v uspořádání použito k lepší regulaci směru šíření referenčního svazku skrz zrcadlo [1]. Optické vlákno je skleněné nebo plastové vlákno, ve kterém se šíří elektromagnetické vlny (světlo) ve směru osy vlákna s využitím principu totálního odrazu na rozhraní dvou prostředí s rozdílným indexem lomu. Vnitřní část vlákna se nazývá jádro, okolo jádra je plášť a primární ochrana vůči vnějšímu rušení. Použité optické vlákno má označení SM600. SM je zkratka pro single mode, tedy jednomodové vlákno. Jednomodová vlákna mají průměr jádra do $10\mu\text{m}$. K navedení světelného svazku do jádra vlákna je použit mikroskopový objektiv [7].

Zdroj koherentního záření [4]

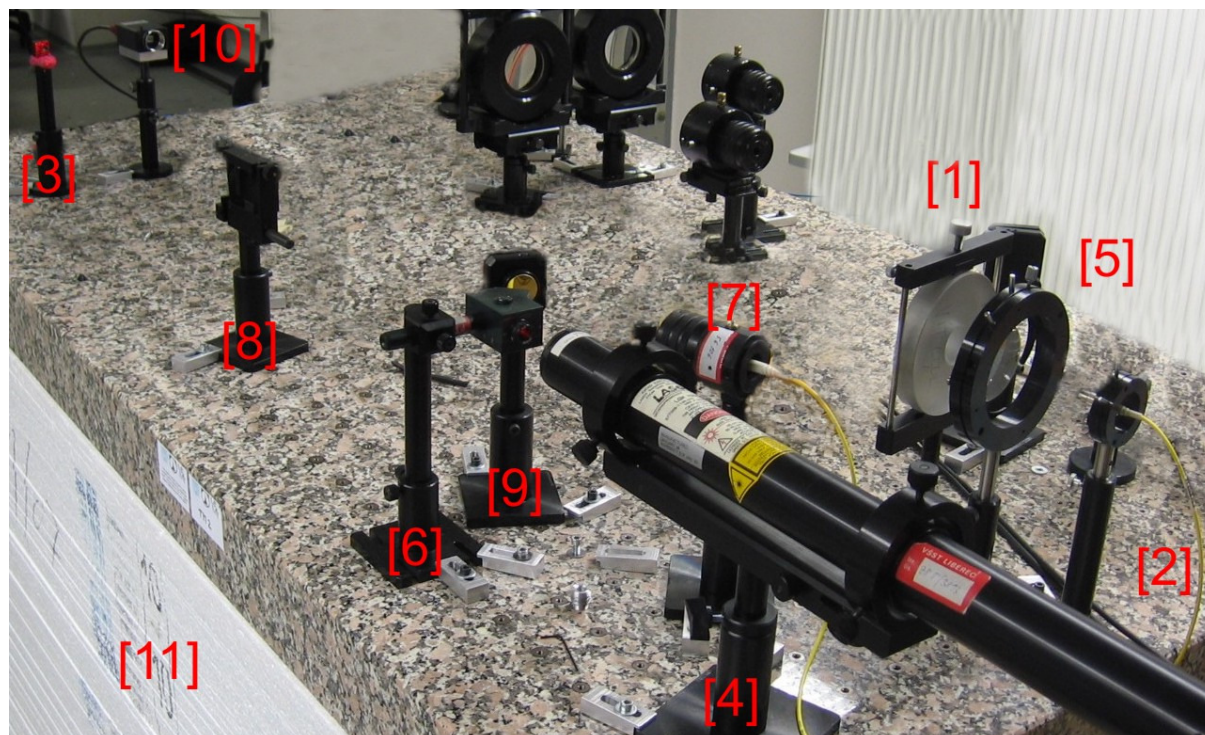
Stejně jako u předchozího uspořádání byl použit laser LGK 7665P (viz kapitola 2.1.1).

Spojná čočka [5]

Použitá spojná čočka nám kolimuje světelný svazek vystupující z optického vlákna [2].

Dělič svazku [6], Mikroskopový objektiv [7,8], Rovinné zrcadlo [9], CCD kamera [10], Optický stůl [11]

Viz kapitola 2.1.2.

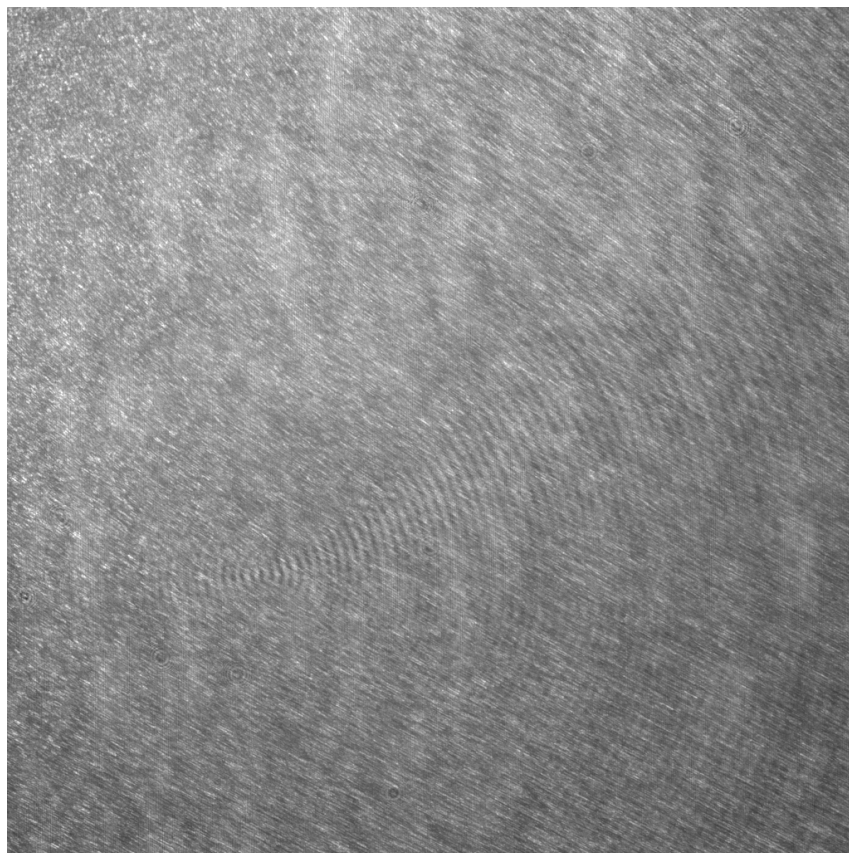


Obr. 23: Druhé uspořádání pro záznam a rekonstrukci digitálního hologramu

2.2.3 Postup při záznamu digitálního hologramu

Stejně jako u předchozího uspořádání je zapotřebí upravit svazky rozdělené děličem [6], co nejvhodněji pro záznam hologramu na CCD. Půlvinovými destičkami na děliči nastavíme shodnou polarizaci obou vystupujících vln. Referenční svazek je nutné co nejpřesněji navést do optického vlákna, jinak intenzita vystupujícího svazku značně klesne. Mikroskopový objektiv [7] nastavíme tak, aby jeho ohnisko bylo ve středu optického vlákna [2]. Námi dosažený výkon vystupujícího svazku z optického vlákna byl přibližně 10% výkonu vstupujícího svazku. Umístíme-li předmět [3] 129,8 cm od zrcadla [1], tedy ve vzdálenosti, která je rovna poloměru křivosti tohoto zrcadla, zobrazí se nám převrácený, stejně velký předmět ve shodné vzdálenosti od zrcadla. CCD kameru umístíme v této vzdálenosti od zrcadla a co nejblíže k zobrazovanému předmětu, abychom potlačili astigmatismus objektového svazku. Kolimovaný referenční svazek optickou čočkou [5] nasměrujeme na CCD chip společně s obrazem předmětu odraženým od zrcadla [1]. Tím, že referenční svazek je veden středem zrcadla, dosáhneme velmi malého úhlu mezi referenčním a odraženým objektovým svazkem. Půlvinovou destičkou na vstupu děliče svazku [6] přibližně nastavíme poměr intenzit referenčního a objektového svazku v rovině CCD k 1:1 a zkontrolujeme směr

polarizace těchto vln. Hologram sejmeme stejně jako u předchozího uspořádání a ořízneme na rozměr 1024 x 1024 pixelů (viz Obr. 24).



Obr. 24: Nasnímaný digitální hologram 1024 x 1024 pixelů

2.3 Numerická rekonstrukce sejmutého hologramu

Vycházíme ze vztahu (20), který nám popisuje difrakci světelné vlny (vlny E_R) na hologramu $h(x, y)$ sejmutém CCD kamerou a umístěného kolmo ke směru šíření světelné vlny. Výsledné pole $\Gamma(\xi', \eta')$ v našem oku vytvoří virtuální obraz zaznamenaného předmětu. Hodnota $\Gamma(\xi', \eta')$ reprezentuje komplexní amplitudu vlny v bodě ξ', η' složené z difrakčních příspěvků ze všech bodů hologramu h .

Zaznamenaný digitální hologram je zapotřebí vyhodnotit a zjistit vlastnost každého pixelu hologramu. Pomocí programovacího prostředí Matlab jsme schopni digitální hologram nejprve vyhodnotit a postupnými kroky složit virtuální obraz zaznamenaného předmětu.

Numerická rekonstrukce může být provedena Fresnelovou aproximací, nebo např. Konvolučním přístupem. Fresnelova aproximace je používanější, ukažme si tedy její princip.

Vztah pro vzdálenost ρ mezi bodem z roviny hologramu a bodem na rekonstruované rovině [viz (21)] můžeme pro hodnoty x, y a ξ, η menší v porovnání se vzdáleností d rozšířit Taylorovým rozvojem (29).

$$\rho = d + \frac{(\xi - x)^2}{2d} + \frac{(\eta - y)^2}{2d} - \frac{1}{8} \frac{[(\xi - x)^2 + (\eta - y)^2]^2}{d^3} + \dots \quad (29)$$

Čtvrtý člen rozvoje může být zanedbán, je-li daleko menší nežli vlnová délka λ , dostaneme...

$$\rho = d + \frac{(\xi - x)^2}{2d} + \frac{(\eta - y)^2}{2d}. \quad (30)$$

Vyjádříme-li takto vzdálenost ρ v rovnici (20) a dosadíme-li konjugovanou vlnu E_R^* na místo referenční vlny E_R dostaneme rovnici (31) pro rekonstrukci skutečného obrazu předmětu.

$$\Gamma(\xi, \eta) = \frac{i}{\lambda d} \exp\left(-i \frac{2\pi}{\lambda} d\right) \times \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} h(x, y) E_R^*(x, y) \exp\left[-i \frac{\pi}{\lambda d} ((\xi - x)^2 + (\eta - y)^2)\right] dx dy \quad (31)$$

Vytknutím nezávislých proměnných před integrály dostaneme...

$$\begin{aligned} \Gamma(\xi, \eta) &= \frac{i}{\lambda d} \exp\left(-i \frac{2\pi}{\lambda} d\right) \exp\left[-i \frac{\pi}{\lambda d} (\xi^2 + \eta^2)\right] \\ &\times \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} h(x, y) E_R^*(x, y) \exp\left[-i \frac{\pi}{\lambda d} (x^2 + y^2)\right] \exp\left[i \frac{2\pi}{\lambda d} (x\xi + y\eta)\right] dx dy \end{aligned} \quad (32)$$

Tato rovnice se nazývá Fresnelova aproximace nebo Fresnelova transformace. Umožňuje rekonstruovat vlnové pole v rovině za hologramem, v tomto případě v rovině skutečného obrazu.

Intenzita I a fáze φ je vyjádřena vztahy (33) a (34).

$$I(\xi, \eta) = |\Gamma(\xi, \eta)|^2 \quad (33)$$

$$\varphi(\xi, \eta) = \arctan \frac{\text{Im}[\Gamma(\xi, \eta)]}{\text{Re}[\Gamma(\xi, \eta)]} \quad (34)$$

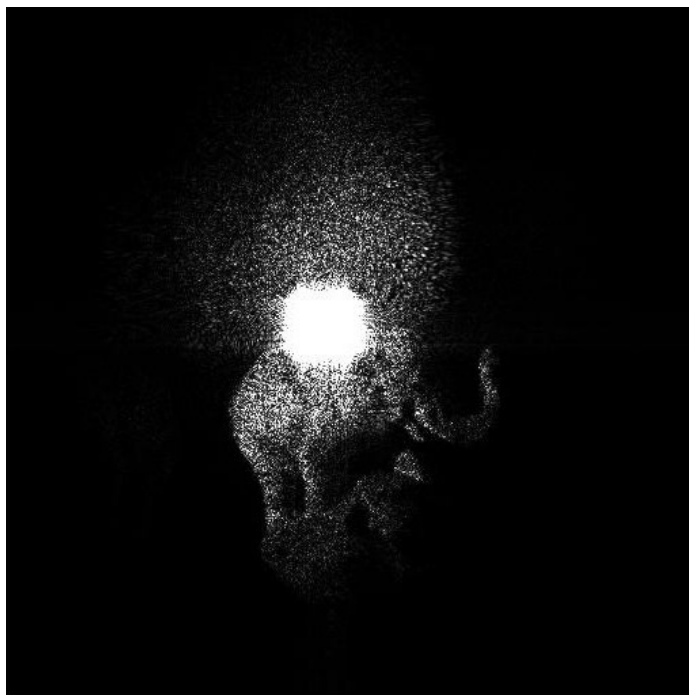
Diskretizujeme-li Fresnelovu aproximaci dostaneme konečný algoritmus pro rekonstrukci našeho hologramu (35).

$$\Gamma(m, n) = \frac{i}{\lambda d} \exp\left(-i \frac{2\pi}{\lambda} d\right) \exp\left[-i\pi\lambda d \left(\frac{m^2}{N^2 \Delta x^2} + \frac{n^2}{N^2 \Delta y^2}\right)\right] \times \sum_{k=0}^{N-1} \sum_{l=0}^{N-1} E_R^*(k, l) h(k, l) \exp\left[i \frac{\pi}{\lambda d} (k^2 \Delta x^2 + l^2 \Delta y^2)\right] \exp\left[-i2\pi \left(\frac{km}{N} + \frac{ln}{N}\right)\right] \quad (35)$$

Kde m a n nabývají hodnot $0, 1, \dots, N-1$, N reprezentuje velikost nasnímaného hologramu, tedy např. hologram měl velikost 512×512 ($N \times N$) pixelů, Δx a Δy jsou rozměry pixelu CCD chipu, d je vzdálenost předmětu od CCD při záznamu hologramu a souřadnice k, l určují bod v rovině hologramu ($k, l=0, 1, \dots, N-1$). E_R^* je, jak již bylo řečeno konjugovaný svazek (Obr. 12), ten ale není možné přesně simulovat, pro usnadnění výpočtu uvažujme rovinnou vlnu dopadající kolmo na hologram $\Rightarrow E_R(k, l) = 1$. Výpočet je daleko efektivnější použitím Fast Fourier Transformace (FFT).

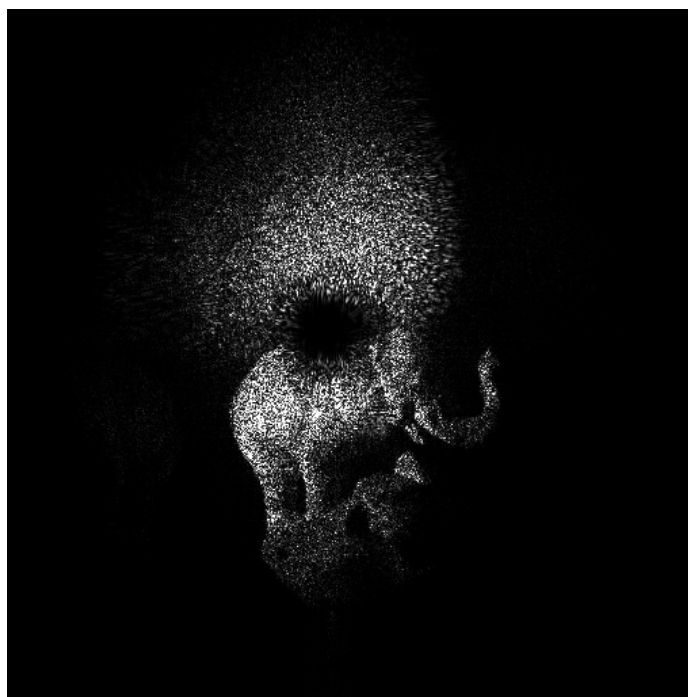
Paralelně s bakalářskou prací probíhala v laboratoři optických metod měření studenta Bc. Pavla Psoty, ten vytvořil v rámci ročníkového projektu program přesně na míru navrženým holografickým uspořádáním (viz kapitoly 2.1, 2.2). Zároveň byla testována funkčnost programu a správnost těchto uspořádání.

Rekonstrukci si ukažme na sejmutém hologramu vytvořeném pomocí prvního uspořádání (viz kapitola 2.1 a Obr. 20). Hologram je velikost 1024×1024 pixelů, pixel CCD chipu má rozměr $4.4 \times 4.4 \mu m^2$. Vzdálenost předmětu od CCD je 27,2 cm ($2 \times 13,6$). Rekonstruovaný obraz můžete vidět na Obr. 25.



Obr. 25: Rekonstruovaný obraz

Světlé místo uprostřed je nulový řád difrakce, tedy nedifraktovaná rekonstrukční vlna E_R , jinak také nazývaná jako stejnosměrná složka. Odstranit ji můžeme několika způsoby, např. maskováním středu hologramu, odečtením střední hodnoty intenzity hologramu vypočtenou z intenzit (256 hodnot šedi) všech pixelů hologramu od každého bodu hologramu $h(k,l)$, nebo tzv. frekvenčním filtrem, kde při rekonstrukci hologramu „vynulujeme“ vlny o nízké prostorové frekvenci.



Obr. 26: Odstranění stejnosměrné složky

3 Výhody a nevýhody různých uspořádání a přístupů k rekonstrukci hologramu

Důležitými aspektem každého uspořádání je kvalita nasnímaného hologramu a s tím spojená kvalita rekonstruovaného obrazu. Kvalita nasnímaného hologramu reprezentuje míru kontrastu, intenzity, četnosti interferenčních obrazců (čar) a kvalitní hologram má co nejméně optických vad vzniklých částčkami, které ulpěly na povrchu optických prvků, bublinkami ve skle různých optických prvků uspořádání. U rekonstruovaného obrazu posuzujeme také kontrast a intenzitu obrazu, ale hlavně podobnost se zaznamenaným předmětem.

Záznamu digitálního hologramu pomocí uspořádání se zrcadlem Cassegrainova typu (viz kapitola 2.2), má několik výhod. Díky referenčnímu svazku, který je veden optickým vláknem a středem zrcadla je možné dosáhnout téměř nulové rozbíhavosti svazku referenčního a objektového θ . Změnou vzdálenosti předmětu od zrcadla můžeme zvětšovat nebo naopak zmenšovat obraz předmětu, který zaznamenáváme na CCD. Mezi výhodou se dá také zařadit jednoduchost tohoto uspořádání. Velká nevýhoda z mého pohledu je ve velké pracovní ploše, kterou toto uspořádání zabírá, je to způsobeno velkým poloměrem křivosti zrcadla. Výkon paprsku vystupujícího z optického vlákna může nabývat malých hodnot oproti vstupujícímu paprsku. To samozřejmě může zapříčinit zhoršení kvality zaznamenaného hologramu. Rozdíl drah referenčního a objektového svazku je složité udržet v rozsahu koherenční délky použitého laseru.

U uspořádání principiálně znázorněném na Obr. 16a je velmi složité nepřekročit maximální dovolený úhel mezi svazkem objektovým a referenčním θ_{\max} . Nemáme tedy takovou toleranci při sestavování, jako např. u uspořádání viz Obr. 16b. Minimální vzdálenost předmětu od CCD je největší z uvedených uspořádání v kapitole 1.9.3. Nasnímaný hologram bývá méně kontrastní a při větších rozměrech předmětu je hologram nekvalitní, minimální předmětová vzdálenost je velmi velká a rekonstrukce je téměř neproveditelná. Je možné sice vytvořit zmenšený virtuální obraz předmětu pomocí optických čoček, ale i tak jsou výsledky dosažené tímto uspořádáním špatné a v digitální holografii se už téměř nepoužívá. Výhodou uspořádání je jeho jednoduchost.

Uspořádání viz Obr. 16b nebo kapitola 2.1 je nejčastěji používané uspořádání v digitální holografii. Můžeme dosáhnout velmi malých úhlů θ a kvalitních hologramů. Minimální objektová vzdálenost je menší nežli u předchozího uspořádání, může tedy zabrat méně pracovní plochy. V navrženém uspořádání (viz kapitola 2.1) je úhel svírající svazek

dopadající na objekt a svazek od něj odražený (objektový) větší nežli 45° , při složité struktuře objektu nejsme schopni zaznamenat celou polovinu objektu. Čím je tento úhel menší, tím jsme schopni lépe zachytit předmět, tedy větší část jeho povrchu. Dostáváme se tedy k dalšímu parametru, který můžeme považovat za výhodu nebo nevýhodu daného uspořádání.

Rekonstruovaný obraz pomocí Fresnelovi aproximace nebo Konvolučního přístupu je téměř stejný. Obě rekonstrukce vycházejí ze vztahu (20) vyjadřujícího difrakci světelné vlny na hologramu. Rozdíl je v tom, jakým způsobem se dopravují k výslednému obrazu. Fresnelova transformace rozkládá svazek na vlny o různých prostorových frekvencích a konvoluce zase uvažuje výsledné světelné pole jako složení paraboloidních vln.

Závěr

Úkolem této bakalářské práce bylo provést rešerši na téma digitální holografie. Rešerše pojednává o základních pojmech, problémech a vlastnostech souvisejících s digitální holografií, jejichž znalost je nezbytná pro realizaci experimentů. Druhou částí práce bylo navrhnout a experimentálně provést dvě různá uspořádání pro záznam a rekonstrukci digitálního hologramu. Do této části také patří numerická rekonstrukce digitálního hologramu, která je zde popsána a za pomoci které byla ověřena správnost navržených uspořádání. Poslední částí bakalářské práce bylo uvést výhody a nevýhody různých uspořádání a přístupů k rekonstrukci digitálního hologramu.

U prvního navrženého uspořádání (viz kapitola 2.1), kdy referenční svazek je spojen s objektovým svazkem procházejícím skrz dvojlomný krystalový dělič, byly dosaženy velmi dobré výsledky. Nasnímaný hologram byl kvalitní stejně tak i jeho numerická rekonstrukce (viz Obr. 26). U nasnímaného hologramu je to hlavně vysoká hodnota kontrastu, intenzity a četnosti interferenčních obrazců, která při posuzování kvality byla brána v potaz. Použitý laser LGK 7665P má poměrně velkou koherenční délku, byli jsme tedy méně omezeni při návrhu uspořádání, ve smyslu dodržet rozdíly drah jednotlivých svazků interferujících v rovině CCD v rozsahu nula až desetina koherenční délky. Rozdíl délek jednotlivých svazků bylo možné pomocí posunu rovinných zrcadel nastavit tak, že byl téměř nulový. Problém byl v nepřekročení maximálního možného úhlu mezi referenčním a objektovým svazkem, který byl určen velikostí obrazového bodu použité CCD kamery (Basler A614f) a již uvedeným laserem. Problém byl vyřešen nahrazením zaznamenávaného objektu rovinným zrcadlem, kterým bylo možné nastavit rozbíhavost objektového a referenčního svazku a také použitím meniskové čočky, díky které byl vytvořen zmenšený virtuální obraz předmětu. Uspořádání je vhodné pro holografický záznam menších objektů.

Druhé navržené uspořádání se zrcadlem Cassegrainova typu (viz kapitola 2.2) je velkým přínosem pro holografické metody vedené v laboratoři optických měření. Uspořádání je funkční, lze tedy takto zaznamenat digitální hologram daného objektu. Pomocí již uvedeného zrcadla, jsme byli schopni objektový svazek vést společně s referenčním svazkem téměř pod nulovým úhlem. Referenční svazek byl veden optickým vláknem a šterbinou ve středu zrcadla. Problém byl navést referenční svazek co nejlépe do optického vlákna tak, aby výstupní svazek měl co největší výkon. Nakonec se podařilo dosáhnout výkonu svazku, který odpovídal 10% výkonu vstupujícího svazku. Dalším problémem bylo dodržení rozdílu drah jednotlivých svazků vstupujících do CCD kamery v mezích od nuly do desetin koherenční

délky laseru (207,2mm). Bylo to způsobeno poměrně velkým poloměrem křivosti zrcadla (1298mm) a vedením referenčního svazku optickým vláknem dlouhým 2m. Dále nás samozřejmě při těchto velkých vzdálenostech limitovala velikost pracovní plochy, tedy optického stolu, na kterém probíhal experiment. Téměř nulového rozdílu drah svazků bylo dosaženo umístěním zaznamenávaného předmětu do vzdálenosti od zrcadla odpovídající jeho poloměru křivosti. Možná vylepšení tohoto uspořádání společně s numerickou rekonstrukcí, která je odlišná od rekonstrukce hologramu zaznamenaného pomocí prvního uspořádání je vhodným tématem pro další semestrální nebo ročníkové práce.

Paralelně s bakalářskou prací probíhala v laboratoři optických metod RSS TUL měření studenta Bc. Pavla Psoty, ten vytvořil v rámci ročníkového projektu program přesně na míru těmto holografickým uspořádáním. Tím zároveň byla testována správnost navržených uspořádání.

Seznam použité literatury

- [1] M. MILER: *Holografie (teoretické a experimentální základy a její použití)*, SNTL 1974
- [2] B. A. E. SALEH, C. M. TEICH: *Základy fotoniky 1 díl*, Matfyzpress 1994
ISBN 80-85863-01-4
- [3] B. A. E. SALEH, C. M. TEICH: *Základy fotoniky 2 díl*, Matfyzpress 1994
ISBN 80-85863-02-2
- [4] B. A. E. SALEH, C. M. TEICH: *Základy fotoniky 3 díl*, Matfyzpress 1995
ISBN 80-85863-05-7
- [5] *Wikipedie: Otevřená encyklopedie: Digital holography* [online]. c2009 [citováno 12. 03. 2009]. Dostupný z WWW: <http://en.wikipedia.org/wiki/Digital_holography>
- [6] P. FIALA, I. RICHTER: *Fyzikální Optika*, ČVUT, 1999,
ISBN 80-01-03183-7
- [7] U. SCHNARS, W. JEUPNER: *Digital Hologram Recording, Numerical Reconstruction, and Related Techniques*, Springer 2005, ISBN 978-3-540-21934-7
- [8] P. PSOTA: *Preliminary project of the numerical reconstruction of digital holograms*, Semestrální projekt, TUL 2009
- [9] P. PSOTA: *Měření koherentní délky LASERu*, Bakalářská práce, TUL 2008

Příloha

Jako příloha je vloženo CD, které obsahuje:

- Bakalářskou práci ve formátu .pdf
- Nasnímané digitální hologramy